THỂ LỆ
VỀ CÔNG BỐ CÔNG TRÌNH KHOA HỌC VÀ ĐĂNG BÀI BÁO KHOA HỌC TRÊN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM

1. Khái quát về Tạp chí Cơ khí Việt Nam:

Tạp chí Cơ khí Việt Nam là cơ quan báo chí thực hiện ngôn luận - lý luận của Tổng hội Cơ khí Việt Nam, đồng thời là tiếng nói, kênh thông tin chính thống của ngành Cơ khí Việt Nam. Tạp chí cũng còn là diễn đàn nghiên cứu khoa học của các nhà quản lý-khoa học-chuyên gia-nghiên cứu sinh, học viên cao học, … trên cả nước, do đó đã được *Bộ Khoa học và Công nghệ cấp ISSN 2615 - 9910 (mã số chuẩn quốc tế đối với xuất bản phẩm nhiều kỳ) và Hội đồng Chức danh Giáo sư Nhà nước công nhận tính điểm công trình khoa học-bài báo khoa học.*

Tạp chí Cơ khí Việt Nam có nhiệm vụ tuyên truyền, phổ biến chủ trương chính sách của Đảng, pháp luật của Nhà nước và định hướng phát triển, hoạt động của ngành Cơ khí Việt Nam; công bố công trình khoa học, kết quả nghiên cứu và chuyển giao công nghệ, chuyên đề khoa học và công nghệ có hàm lượng khoa học và giá trị thực tiễn cao của nhà quản lý-khoa học-chuyên gia, giảng viên, nghiên cứu sinh, học viên cao học, … trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí. Ngoài ra, Tạp chí cũng còn là nơi công bố những phát minh, sáng chế, kết quả, thành tích, điển hình tiên tiến trong hoạt động nghiên cứu khoa học, quản lý, đào tạo và sản xuất, kinh doanh lĩnh vực Cơ khí ở trong và ngoài nước tới đông đảo bạn đọc.

2. Việc công bố công trình khoa học/ đăng bài báo khoa học trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam:

Tạp chí Cơ khí Việt Nam nhận công bố công trình khoa học/ đăng bài báo khoa học trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí của nhà quản lý-khoa học-chuyên gia-nghiên cứu cứu sinh, học viên cao học,… trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam (bản in giấy), gồm: *[1]Cơ khí Chế tạo máy, [2]Cơ khí Quốc phòng, [3]Cơ khí Giao thông, [4]Cơ khí Nông-lâm nghiệp, [5]Cơ khí Xây dựng, [6]Cơ khí Thủy sản, [7]Cơ khí Địa chất, [8]Cơ khí Hóa chất, [9]Cơ khí Bảo quản chế biến nông lâm thủy sản, [10]Cơ khí Động cơ đốt trong, [11]Cơ khí Ô tô - Máy kéo, [12]Cơ khí Máy thủy khí, [13]Cơ khí Công nghệ nhiệt lạnh, [14]Cơ khí máy năng lượng, [15]Cơ khí Công nghệ dệt, [16]Cơ khí Công nghệ cắt may, [17]Cơ khí Cơ-điện tử, [18]Cơ khí Kỹ thuật hệ thống công nghiệp, [19]Cơ khí đào tạo nguồn nhân lực và nghiên cứu chuyển giao.*

3. Thể lệ về công bố công trình khoa học/ đăng bài báo khoa học trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam. Do đó, công trình khoa học/ bài báo khoa học khi được đăng trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam phải đảm bảo các yêu cầu, như sau:

3.1. Yêu cầu chung: Công trình khoa học/ bài báo khoa học đăng trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam phải là kết quả nghiên cứu gốc; bài báo tổng quan hoặc bài viết thông tin khoa học *(short communications).*

3.2. Bản thảo: Bài báo đăng trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam, gồm có các phần:

1. Tên bài báo (bằng tiếng Việt và bằng tiếng Anh).
2. Tên tác giả, đồng tác giả (kèm theo ghi chú về chức danh khoa học, học hàm, học vị, tên cơ quan công tác, email).
3. Tóm tắt bài báo bằng tiếng Việt và tiếng Anh không quá 350 từ (bao gồm có từ khóa tiếng Việt và tiếng Anh, đối với cụm từ khóa có khoảng 5 - 15 từ khóa).
4. Đặt vấn đề.
5. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu.
6. Kết quả và thảo luận (có thể tách thành 2 phần riêng biệt: Kết quả, Thảo luận).
7. Kết luận.
8. Tài liệu tham khảo (trích dẫn theo đúng quy định bài báo quốc tế).

Bản thảo được soạn trên máy vi tính, sử dụng Unicode, kiểu chữ Time New Roman, cỡ chữ 14, trên giấy A4 - một mặt, chế độ dãn dòng: "1.5 lines spacing", căn lề trái phải mỗi bên: 3 cm, căn lề trên dưới: 2,5 cm, chế độ lề: "justified". Dung lượng mỗi bài báo khoảng 1.600-2.500 từ. Các đồ thị, hình và ảnh cần trình bày rõ ràng.

Các thuật ngữ khoa học nếu chưa được Việt hóa thì ưu tiên dùng nguyên bản tiếng Anh. Các ký hiệu viết tắt cần phải giải thích khi xuất hiện lần đầu.

Thứ tự bảng và hình được đánh số theo trình tự trong bài, không đánh theo thứ tự đề mục. Không được viết tắt các tiểu mục, tên bảng, hình vẽ. Tên bảng được ghi bên trên bảng, tên hình vẽ được ghi bên dưới hình. Chú thích in nghiêng.

Chỉ có những tài liệu được trích dẫn thực sự trong nội dung bài viết mới đưa vào phần tài liệu tham khảo. Tài liệu tham khảo được sắp xếp theo thứ tự trích dẫn (tài liệu tiếng nước ngoài được sắp xếp theo họ của tác giả, tài liệu tiếng Việt sắp xếp theo tên tác giả) và theo trình tự: tên tác giả, năm xuất bản trong ngoặc đơn (…), tên sách, tên nhà xuất bản, nơi xuất bản (đối với sách), hoặc tên bài báo, tên tạp chí, tập, số (đối với bài báo), trang đầu và trang cuối của tài liệu. Đối với những tài liệu không có tác giả thì xếp theo chữ cái của từ đầu tiên của cơ quan ban hành tài liệu. Trong bản thảo, ở những nội dung tác giả đã tham khảo hoặc sử dụng kết quả nghiên cứu từ các tài liệu khoa học khác, cần đánh dấu bằng số (đặt trong dấu […]) - là số thứ tự của tài liệu xếp trong danh mục các tài liệu tham khảo. Tài liệu tham khảo cần ghi theo ngôn ngữ gốc, không phiên âm, không dịch.

3.3. Gửi hoặc nộp bài: Bản thảo gồm 2 bản in và 1 bản điện tử. Khi đăng kí nộp bài, các tác giả có thể đề xuất 2 phản biện. Việc chọn các phản biện chuyên môn phù hợp thuộc quyền của Hội đồng Biên tập Tạp chí Cơ khí Việt Nam.

3.4. Phản biện: Sau khi nhận bài viết gửi đăng đúng với Thể thức quy định của Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Hội đồng Biên tập sẽ gửi bài viết cho các phản biện.

Những bài viết được chấp nhận đăng, các tác giả sẽ nhận được thư phản hồi của Hội đồng Biên tập với thời gian sửa chữa được yêu cầu tùy theo chất lượng của bài viết. Bản sửa chữa lần cuối của tác giả sẽ được coi là bản gốc.

Bản thảo có thể nộp trực tiếp hoặc gửi qua E-mail của Tạp chí.

Quý tác giả muốn biết thêm thông tin, xin vui lòng liên hệ với **TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM**

Địa chỉ: Số 4 Phạm Văn Đồng (trong Viện Nghiên cứu Cơ khí), Mai Dịch, Cầu Giấy, Hà Nội
Điện thoại: (024) 37 920 650 - 0985 696 263 / 0982 254 465
Email: Tcckvn.bbkh@gmail.com * **Website:** cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

TỔNG BIÊN TẬP
HÀ DUY KHÁNH

PHÓ TỔNG BIÊN TẬP
ĐẶNG VĂN LONG

HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP
TS. **ĐỖ HỮU HÀO** (Chủ tịch)
GS,TSKH. **BÀNH TIẾN LONG** (P. Chủ tịch)
TSKH. **PHAN XUÂN DŨNG**
PGS,TS. **HÀ MINH HÙNG**
PGS,TS. **TRƯƠNG VIỆT ANH**
GS,TS. **ĐINH VĂN CHIẾN**
GS,TSKH. **PHẠM VĂN LANG**
GS,TS. **CHU VĂN ĐẠT**
PGS,TS. **TRẦN VĨNH HƯNG**
PGS,TS. **ĐÀO QUANG KẾ**
PGS,TS. **NGUYỄN VĂN BÀY**
PGS,TS. **ĐÀO DUY TRUNG**
PGS,TS. **LÊ THU QUÝ**
PGS,TS. **BÙI TRUNG THÀNH**
PGS,TS. **LÊ VĂN ĐIỂM**
GS,TS. **LÊ ANH TUẤN**
GS,TS. **NGUYỄN HỮU LỘC**
PGS,TS. **DƯƠNG VĂN TÀI**
TS. **PHAN ĐĂNG PHONG**
TS. **TẠ NGỌC HẢI**
PGS,TS. **TRẦN NGỌC HIỀN**
PGS,TS. **TRƯƠNG HOÀNH SƠN**
TS. **HỒ TRẦN ANH NGỌC**
TS. **NGÔ TRỌNG BÍNH**
PhD. **MIKE PHÙNG**

THIẾT KẾ MỸ THUẬT
NGÂN GIANG

*Tạp chí Cơ khí Việt Nam:
- In tại Công ty Cổ phần In Khoa học Công nghệ Hà Nội
- Khuôn khổ 20,5cm x 28,5cm
- 620 trang
- Xuất bản mỗi tháng một kỳ
- Giá bán 120.000 đồng/quyển Tạp chí



TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM
Số 4 Phạm Văn Đồng (trong Viện Nghiên cứu Cơ khí), P. Mai Dịch, Cầu Giấy, Hà Nội
Điện thoại: (024) 3792 0650 **Hotline:** 0985 696 263 - 0982 254 465
Email: tcckvietnam@gmail.com
Website: cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

* * *
Giấy phép hoạt động Tạp chí in và Tạp chí Điện tử của Bộ Thông tin và Truyền thông
Số 378/GP-BTTTT, ngày 22 tháng 6 năm 2021

Văn bản chấp thuận tăng trang số 927/BC-QLBC ngày 18 tháng 6 năm 2025 của Cục Báo chí, Bộ Văn hóa, Thể thao và Du lịch đề xuất bản số 329, tháng 6 năm 2025

Văn phòng đại diện:

1. Tại TP. Hồ Chí Minh:
- PGS,TS. **Bùi Trung Thành**
Phòng T4.0, Nhà T, Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh
Số 12 Nguyễn Văn Bảo, phường 4, quận Gò Vấp, TP. Hồ Chí Minh
Điện thoại: 0913 921 407
Email: tcck.tphcm@gmail.com

- GS,TS. **Nguyễn Hữu Lộc**
Phòng 205, Nhà B11, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh,
số 268 Lý Thường Kiệt, phường 14, Quận 10, TP. Hồ Chí Minh.
Điện thoại: 0913 603 264
Email: nhloc@hcmut.edu.vn

2. Tại tỉnh Quảng Ninh:
- TS. **Hoàng Minh Thuận**
Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng, Liên Phương, Phương Đông, Uông Bí, Quảng Ninh
Điện thoại: 0904 116 189
Email: minhthuan.tcckvn@gmail.com

3. Tại Thái Nguyên:
- GS,TS. **Vũ Ngọc Pi**
Số 234 Phú Xá, TP. Thái Nguyên, tỉnh Thái Nguyên
Điện thoại: 0974 905 578
Email: vungocpi@tnut.edu.vn

Phóng viên thường trú:

1. Tại Hải Phòng:
- Lê Thế Hiệp
Điện thoại: 0913 063 747
Email: daidientcck@gmail.com

MỤC LỤC
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM SỐ 329, THÁNG 6 NĂM 2025

Trang

NGHIÊN CỨU – TRAO ĐỔI (10– 614)

1. PGS,TS. **Phan Văn Hiếu**: Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ tới độ nhám bề mặt khi gia công tia lửa điện bằng phương pháp xung định hình..... 10

2. **Phạm Trọng Nhân, Phùng Trí Công, Văn Ngọc Hiệp, Đỗ Huỳnh Nhật**: Thiết kế chế tạo bộ cấp phôi và dập cánh quạt ly tâm bán tự động dùng trong hệ thống hút bụi và sợi thuốc lá..... 16

3. **Trương Chí Công, Trần Quang Giang, Chu Văn Hiếu, Vũ Trọng Nam, Nguyễn Việt Anh**: Nghiên cứu mô phỏng dòng chảy nhựa bằng phần mềm NX: so sánh cổng Pin Point và Side Gate..... 23

4. **Phạm Thị Minh Huệ, Đặng Văn Đông, Trần Đăng Đức, Nguyễn Đức Dương, Nguyễn Thế Bảo, Nguyễn Chí Dũng, Nguyễn Huy Hoàng, Nguyễn Đức Long, Nguyễn Đức Thật**: Thiết kế chế tạo bộ phận vận chuyển cây giống trong máy trồng chuối nuôi cấy mô..... 29

5. **Đặng Quốc Vương, Lê Đức Huy, Ngô Lê Hoàng Long, Bùi Quốc Thắng, Lương Thanh Nhật**: Thiết bị đo điện tim cầm tay hỗ trợ chẩn đoán bệnh từ xa..... 34

6. TS. **Lê Thanh Tuấn**, PGS,TS. **Vũ Ngọc Tuấn**, ThS. **Đỗ Nhật Trường**: Khảo sát ảnh hưởng của chu trình hoạt động đến tiêu hao năng lượng trên ô tô..... 40

7. **Triệu Quý Huy**: Tối ưu hóa thiết kế và phân tích động học cơ cấu ba bánh leo cầu thang cho xe kéo nhỏ gọn vận chuyển hàng hóa..... 46

8. **Trương Minh Đức, Hoàng Đức Cường, Vũ Toàn Thắng**: Nâng cao độ chính xác của hệ thống đo độ phẳng không tiếp xúc bằng công nghệ đệm khí..... 50

9. **Lưu Thế Duyệt, Đồng Minh Tuấn, Khổng Văn Nguyên, Trần Bùi Bông**: Ứng dụng Matlab – Simulink mô phỏng hệ thống truyền lực xe hybrid sử dụng hộp số kiểu hai chế độ 56

10. **Lương Văn Tới, Huỳnh Công Lớn**: Nghiên cứu sự ảnh hưởng của vị trí đầm dùi và tỉ số nén của khuôn đến chất lượng bó vỉa bêtông trong máy đúc bó vỉa hè sử dụng đầm dùi để tạo rung động..... 64

11. **Nguyễn Hoàng Long, Huỳnh Hồ Trung Tịnh, Nguyễn Duy Ánh**: Điều khiển robot đa hướng ba bánh bằng phương pháp dự báo mô hình..... 73

12. TS. **Ngô Gia Việt**: Xây dựng mô hình toán nhằm đánh giá ảnh hưởng của quá trình uốn tới độ chính xác gia công ống thép tàu thủy..... 82

13. ThS. **Nguyễn Đức Bình**, ThS. **Nguyễn Mạnh Chiều**: Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp cáu cặn đến hiệu suất nhiệt của bộ trao đổi nhiệt kiểu ống vỏ..... 88

14. **Nguyễn Thanh Tuấn, Khổng Văn Nguyên**: Ứng dụng Matlab – Simulink mô phỏng quá trình cháy của động cơ trang bị hệ thống phun nhiên liệu Commonrail..... 93

15. ThS. **Vũ Huy Khôi**, ThS. **Mai Văn An**, ThS. **Tạ Bá Dũng**: Nghiên cứu ảnh hưởng của lỗ trích khí đến hoạt động của máy tự động trên súng trường STR406..... 99

16. KS. **Đỗ Văn Tỉnh**, ThS. **Nguyễn Tuấn Hưng**: Tối ưu hóa cấu trúc của cánh tay robot năm bậc tự do bằng phương pháp mô phỏng phân tích..... 103

17. ThS. **Lê Huỳnh Đức**, ThS. **Vũ Văn Thi**, ThS. **Nguyễn Tuấn Hưng**: Xây dựng mô hình mô phỏng lá nhíp ô tô bằng phương pháp phần tử hữu hạn..... 107

18. TS. **Phạm Thị Thủy**, ThS. **Nguyễn Sơn Tùng**: Lựa chọn vật liệu chế tạo răng cắt phá hủy đất đá sử dụng tại các mỏ than hầm lò vùng Quảng Ninh..... 111

19. **Nguyễn Thành Trung**: Phân tích các tình huống đâm va trong hàng hải và các bài học kinh nghiệm dựa trên quy tắc COLREGs 72..... 116
20. **Nguyễn Thế Lương**: Nghiên cứu ảnh hưởng của tuổi đời xe và chế độ bảo dưỡng đến chất lượng phát thải của xe máy phun xăng điện tử đang lưu hành..... 122
21. **Nguyễn Trường Giang, Nguyễn Hồng Lĩnh**: Thiết kế bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và nhiều biến ứng dụng cho robot công nghiệp..... 130
22. **Phạm Đức Thiên, Nguyễn Thanh Tùng**: Xây dựng mô hình toán để tạo hình biên dạng rotor CIC bơm roots..... 135
23. **Nguyễn Quốc Toản, Bùi Thanh Hương**: Nghiên cứu xây dựng mô hình ma-nơ-canh ảo từ dữ liệu quét 3D ứng dụng trong thiết kế và thử sửa mẫu ảo..... 140
24. **Tăng Bá Đại, Nguyễn Thị An Khang, Ngô Phi Hùng, Lê Thế Quốc Hưng**: Ảnh hưởng tốc độ vòng quay động cơ diesel HINO XZU650 đến nồng độ phát thải khí xả..... 147
25. **Lê Trạch Trưởng, Vũ Trần Hoàng, Nguyễn Văn Minh, Phí Hoàng Trình**: Nghiên cứu mô phỏng quá trình phanh tái sinh trên xe VF3..... 152
26. **Trần Văn Mạnh**: Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng gia công vật liệu da bằng phương pháp dây nóng..... 158
27. **Nguyễn Tiến Dũng**: Tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình gia công vi-EDM vật liệu Ti6Al4V bằng điện cực WC sử dụng phương pháp Taguchi – TOPSIS..... 162
28. **Nguyễn Văn Mùi**: Tự động hóa quá trình thiết kế thiết bị cấp phôi tự động theo nguyên lý rung động..... 165
29. **Trần Văn Mạnh**: Tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình gia công da bằng dây nóng sử dụng phương pháp Taguchi – DEAR..... 172
30. **Vũ Tiến Đại, Hoàng Trần Đăng, Đỗ Hoàng Lãm, Đỗ Tuấn Anh, Trần Đức Nghĩa**: Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số vận hành đến đặc tính hoạt động của hệ thống truyền lực trên ô tô điện..... 176
31. **Nguyễn Thành Đông**: Sai số phi tuyến chu kỳ trong giao thoa kế heterodyne sửa đổi trong phép đo dịch chuyển nhỏ..... 183
32. **Nguyễn Thành Đông**: Hiệu chỉnh phép đo pha và dịch chuyển trong giao thoa kế homodyne điều biến tần số..... 188
33. **Nguyễn Tiến Huy, Vũ Minh Hùng, Đỗ Thế Vinh**: Nghiên cứu cấu trúc tế vi liên kết hàn giáp mối thép A572-GRADE 50 cho trụ điện gió tại Việt Nam bằng quá trình hàn GMAW..... 194
34. **Luyện Văn Hiếu, Trần Mạnh Duy, Nguyễn Đình Hạnh**: Mô phỏng hệ thống truyền lực thu hồi năng lượng trên xe lu bánh lốp..... 200
35. **Đinh Mai Hương, Lê Thị Lành**: Ảnh hưởng của thông số công nghệ may đến độ bền và độ giãn đứt đường may 514 trên vải dệt kim single..... 208
36. PGS,TS. **Đinh Văn Thắng**: Ứng dụng thuật toán logic trong xác định pha chạm đất cho lưới điện trung áp mỏ..... 216
37. **Nguyễn Thị Ngọc Huyền**: Mô phỏng điều khiển hệ thống phun PU trong sản xuất tôn 5 sóng với TIA Portal..... 221
38. **Võ Ngọc Anh Tuấn, Vũ Hoàng Thái Duy, Lê Trung Hòa**: Thiết kế và chế tạo máy in 3D – FDM tốc độ cao..... 226
39. **Nguyễn Thành Trung**: Đánh giá độ chính xác của panme đầu đo chữ V thông qua so sánh với máy đo tọa độ..... 232
40. **Bùi Trọng Hiếu, Trần Thị Kiều My, Huỳnh Hữu Nghị**: Nghiên cứu ảnh hưởng của thông số công nghệ đến độ chính xác của sản phẩm Green Part trong công nghệ in 3D kim loại theo phương pháp Extrusion-based Additive..... 238

41. **Nguyễn Thị Ngọc Huyền, Lê Đức Bảo**: Nghiên cứu mô hình thử nghiệm kiểm tra hệ thống phanh khẩn cấp thang máy gia đình..... 248
42. **Hoàng Trọng Trần Huy**: Điều độ động tàu vào bến cảng container bằng giải thuật Local Search..... 254
43. **Lê Hoàng Bảo, Trần Nguyên Duy Phương, Nguyễn Văn Thành, Trương Quốc Thanh, Đinh Trường Hoàng Vinh**: Thiết kế thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng chi trên và chi dưới cho bệnh nhân sau đột quỵ não..... 262
44. **Lê Bảo Việt, Nguyễn Tiến Dũng, Vũ Đình Hoan, Nguyễn Đình Dương, Trương Văn Thuận**: Nghiên cứu ứng dụng bộ điều khiển PID vào hệ thống treo bán tích cực nhằm nâng cao độ êm dịu của ô tô..... 268
45. **Nguyễn Văn Quang, Phạm Sơn Minh, Quách Văn Thiêm, Nguyễn Văn Mang**: Nghiên cứu quá trình biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ phục vụ liên kết hàn ống rẽ nhánh..... 274
46. **Trần Nhựt Quang, Hồ Xuân Thành, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng**: Thực nghiệm chế tạo mẫu liên kết hai lớp vật liệu bằng phương pháp ép ở nhiệt độ cao..... 282
47. **Vy Lăng Thiên Phước, Nguyễn Tiến Dũng, Trần Thanh Thưởng, Nguyễn Trà Kim Quyên**: Nghiên cứu chế tạo mô hình giải nhiệt dạng lớp cho lòng khuôn với sản phẩm dạng lõm..... 290
48. **Nguyễn Tấn Đạt, Trần Thanh Lam, Huỳnh Nguyễn Hoàng, Lê Thanh Tùng**: Thực nghiệm đo nhiệt độ lòng khuôn dạng phẳng..... 298
49. **Nguyễn Sỹ Huy, Nguyễn Phan Anh, Huỳnh Quang Duy, Phan Thanh Nhàn**: Ảnh hưởng của các thông số đến kích thước đường hàn..... 305
50. **Nguyễn Hoàng Vũ, Nguyễn Phan Anh, Phan Thanh Nhàn, Vũ Quang Huy**: Nghiên cứu ảnh hưởng của thông số chấn đến bán kính cong của ống..... 313
51. **Trần Quang Vinh, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng, Phan Thanh Nhàn**: Chế tạo các mẫu thử độ bền uốn bằng phương pháp hàn TIG..... 321
52. **Nguyễn Thuỳ Diễm Quyên, Trần Thanh Thưởng, Vũ Quang Huy, Đỗ Văn Đại**: Chế tạo tấm khuôn bằng phương pháp tạo hình theo lớp..... 328
53. **Nguyễn Văn Hoàng Long, Nguyễn Khắc Nhàn, Đỗ Văn Hiến, Âu Thị Kim Loan**: Thử nghiệm module giữ và chấn ống kim loại..... 335
54. **Phạm Đức Toản, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn**: Nghiên cứu dự đoán ứng suất kéo của kết cấu dạng lattice..... 341
55. **Lê Vũ Quang Huy, Hồ Sỹ Hùng, Nguyễn Trọng Hiếu, Nguyễn Hải Hoàn**: Nghiên cứu thực nghiệm hàn thép tấm ở vị trí đầu mí..... 349
56. **Nguyễn Quốc Đoàn, Nguyễn Lê Tường, Đỗ Văn Hiến, Phan Thanh Nhàn**: Thực nghiệm chế tạo chi tiết dạng tấm bằng phương pháp chấn..... 357
57. **Võ Nguyễn Anh Tú, Nguyễn Văn Sơn, Hoàng Trọng Nghĩa, Tạ Nguyễn Minh Đức**: Dự đoán đường cong ứng suất uốn..... 366
58. **Nguyễn Văn Mạnh, Nguyễn Trà Kim Quyên, Trần Thanh Lam, Nguyễn Văn Sơn**: Nghiên cứu thực nghiệm độ bền uốn của liên kết hàn thép tấm dạng đầu mí..... 373
59. **Luu Anh Tung, Hoang Van Got, Do The Vinh, Vu Ngoc Pi, Hoang Anh Toan**: MRR optimization in Nano-MQL milling of hardened 90CrSi tool steel using CUO nanoparticles..... 380
60. **Phạm Sĩ Hưng, Nguyễn Lê Tường, Huỳnh Quang Duy, Vũ Quang Huy**: Quy trình tạo mẫu và thử nghiệm độ bền cho mẫu hàn liên kết dạng đâu mí..... 388
61. **Nguyễn Dương Quang Huy, Tạ Nguyễn Minh Đức, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn**: Nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice..... 394
62. **Nguyễn Hữu Phước, Trương Minh Trí, Nguyễn Lê Tường, Nguyễn Hải Hoàn**: Thiết kế module hàn thép..... 403

63. **Trần Xuân Hoàng, Nguyễn Văn Tú, Nguyễn Quang Sáng, Tạ Nguyễn Minh Đức**: Nghiên cứu chế tạo chi tiết chịu uốn có dùng kết cấu lattice..... 412
64. **Hồ Minh Trí, Dương Văn Linh, Nguyễn Văn Tú, Trần Thanh Lam**: Thực nghiệm nhiệt độ của lòng khuôn âm với các thông số gia nhiệt khác nhau..... 419
65. **Lê Đức Thắng, Trần Thanh Thưởng, Trần Thanh Lam, Nguyễn Quang Sáng**: Thực nghiệm đo phân bố nhiệt độ của lòng khuôn phun ép nhựa..... 426
66. **Huỳnh Văn An, Trần Thế San, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Trà Kim Quyên**: Phân bố nhiệt độ của lòng khuôn dương với các thông số gia nhiệt khác nhau..... 434
67. **Nguyễn Thị Thúy Ngọc, Đinh Thị Xuân, Ngô Chí Trung**: Đặc trưng xoắn và kéo đứt của một số mẫu chỉ may thông dụng trên thị trường Việt Nam..... 440
68. TS. **Phạm Thanh Nhựt**: Thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng của kết cấu vách đến tổn thất nhiệt của hầm bảo quản lạnh trên tàu cá vỏ gỗ..... 445
69. **Nguyễn Thị Bích Hậu, Đỗ Đức Thành**: Nghiên cứu sử dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng để điều chỉnh dung lượng bù phân tán lưới trung áp 35kV nhằm giảm tổn thất điện năng..... 452
70. **Đỗ Thị Kim Liên, Nguyễn Duy Chiến**: Tích hợp phương pháp Entropy và phương pháp RAM (phương pháp đánh giá gốc) để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép SKD11.... 458
71. **Trần Đức Toàn**: Nghiên cứu xây dựng phương pháp bổ sung lượng bù do biến dạng đàn hồi cho thuật toán xác định lượng bù sai số vị trí của vít me – đai ốc bi..... 470
72. **Trần Lâm**: Nghiên cứu công nghệ sửa chữa đầu chốt nối cánh tuabin hơi nước thép không gỉ AISI 422SS bằng công nghệ in 3D laser bột..... 470
73. **Nguyễn Anh Tuấn**: Mô phỏng khe hở đầu cánh tuabin sử dụng khoang lõm kết hợp gân. 478
74. PGS,TS. **Phan Văn Hiếu**: Thiết kế, chế tạo mô hình máy ép bánh trung thu sử dụng vi điều khiển Arduino Nano..... 488
75. **Trần Trọng Tuấn, Nguyễn Hoàng Vũ, Vũ Ngọc Khiêm**: Thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ tuần hoàn khí thải (%EGR) đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng, môi trường của động cơ diesel Hyundai D4CB 2.5 TCI-A..... 495
76. **Nguyễn Vũ Cường, Phạm Minh Hiếu, Đỗ Đức Thành, Phạm Thị Tuyết Thanh, Đặng Quốc Vương**: Tính toán, mô phỏng biến dạng và lực tác động lên vỏ máy biến áp công suất lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn..... 502
77. PGS,TS. **Phan Văn Hiếu**: Nghiên cứu ảnh hưởng của điện áp đánh lửa (U) đến độ nhám bề mặt khi xung thép C45 bằng điện cực Graphit trên máy xung định hình CNC (P26+E30) – MAXSEE..... 507
78. **Trần Minh Thúy**: Mô hình hóa động học robot tác hợp gia công cơ khí..... 514
79. **Nguyễn Văn Thạnh, Nguyễn Hữu Lộc**: Ứng dụng phân tích phần tử hữu hạn để trực quan hóa trường ứng suất-biến dạng nhằm tìm biện pháp nâng cao độ bền mỏi của chi tiết máy 521
80. **Võ Thanh Hòa, Nguyễn Phan Thanh Hào, Nguyễn Hữu Lộc**: Nghiên cứu các nhân tố ảnh hưởng đến độ bền tiếp xúc bánh răng nhựa sử dụng phương pháp Taguchi..... 528
81. **Trần Văn Lợi, Nguyễn Hùng Mạnh, Trần Xuân Nhã**: Nghiên cứu ứng dụng MPC-LTI cho điều khiển chuyển làn xe tự hành..... 536
82. **Nguyễn Hùng Mạnh**: So sánh các cấu hình truyền lực Ô tô Hybrid (HEV)..... 542
83. ThS. **Đỗ Hữu Tuấn**, ThS. **Phùng Công Dũng**: Ứng dụng phần mềm WorkingModel phân tích động lực học của cầu trục một dầm..... 549
84. **Hoàng Minh Tuấn**: Ổn định của vòng đàn hồi chịu tải trọng thủy tĩnh..... 554
85. **Trương Việt Anh, Lê Thị Thái**: Khảo sát ảnh hưởng của xâm thực trong khai thác vận hành chân vịt seri B bằng phương pháp quan sát vết sơn..... 559

86. **Bui Van Binh**: Numerical buckling analysis of laminated composite wing-shaped plates with box-type stiffeners under uniform compression..... 565
87. **Bui Van Binh, Pham Hai Trinh**: Free vibrational and buckling analysis of C-section laminated composite beam..... 572
88. **Le Xuan Thuy**: Dynamic analysis of stiffened shallow shell on nonlinear elastic supports subjected to blast loading..... 579
89. **Van-Thanh Ngo**: Vibration analysis of a rotor system supported by nonlinear hydrodynamic bearings..... 584
90. **Tran Quoc Hung, Hoang Van Got, Do The Vinh, Vu Ngoc Pi, Hoang Anh Toan**: Surface roughness modeling and parameter influence in Nano-MQL milling process..... 590
91. **Truong Thi Thu Huong, Vu Trung Tuyen, Nguyen Thi Quoc Dung, Le Thi Phuong Thao**: Surface roughness optimization in EDM considering graphite electrode type using Gaussian process regression..... 598
92. **Hung Quach, Nguyen Hong Linh, Le Ha An**: Strain localization and fracture strain path in a high-strength 7075 aluminum alloy..... 605
93. **Vo Ngoc Anh Tuan, Nguyen Duc Nhan, Phan Xuan Vu Kha**: Fabricate a soft robotic actuator using FDM 3D printing..... 609

DOANH NGHIỆP – DOANH NHÂN (615 – 616)

LILAMA 10 – Ghi dấu ấn quan trọng tại dự án Thủy điện Hòa Bình mở rộng..... 615

DANH SÁCH
NHÀ KHOA HỌC THAM GIA PHẢN BIỆN KHOA HỌC CÁC BÀI BÁO KHOA HỌC ĐĂNG TẢI TRÊN CHUYÊN MỤC NGHIÊN CỨU – TRAO ĐỔI TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, SỐ 329, THÁNG 6 NĂM 2025

TT	HỌC HÀM, HỌC VỊ; HỌ VÀ TÊN	ĐƠN VỊ CÔNG TÁC
1	PGS,TS. **Đỗ Đức Trung**	Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
2	TS. **Nguyễn Trọng Tuấn**	
3	TS. **Hà Thanh Hải**	
4	PGS,TS. **Phạm Thị Thu**	Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
5	PGS,TS. **Vũ Thanh Tùng**	
6	PGS,TS. **Bùi Tuấn Anh**	
7	PGS,TS. **Nguyễn Thành Trung**	
8	PGS,TS. **Bùi Hải Lê**	
9	TS. **Vũ Tiến Dũng**	
10	TS. **Trần Trọng Đạt**	
11	TS. **Hán Lê Duy**	
12	TS. **Đinh Công Trường**	
13	TS. **Nguyễn Lan Phương**	
14	TS. **Nguyễn Hải Sơn**	
15	TS. **Trương Văn Thuận**	
16	TS. **Đào Anh Tuấn**	Trường Vật liệu, Đại học Bách Khoa Hà Nội
17	TS. **Trần Văn Thực**	Đại học Bách Khoa Hà Nội
18	PGS,TS. **Võ Tường Quân**	Trung tâm Nghiên cứu thiết bị và Công nghệ Cơ khí Bách Khoa
19	PGS,TS. **Phạm Thị Minh Huệ**	Trường Cơ khí – Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
20	TS. **Nguyễn Mạnh Dũng**	
21	TS. **Nguyễn Xuân Tuấn**	
22	PGS,TS. **Nguyễn Quốc Mạnh**	Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên
23	TS. **Nguyễn Văn Thịnh**	
24	TS. **Trần Văn Thoan**	
25	TS. **Nguyễn Văn Nhỉnh**	
26	PGS,TS. **Nguyễn Thanh Hải**	Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
27	TS. **Nguyễn Duy Ánh**	
28	TS. **Trương Ngọc Cường**	
29	TS. **Hồ Minh Tuấn**	
30	TS. **Võ Ngọc Anh Tuấn**	
31	TS. **Huỳnh Hữu Nghị**	

32	TS. **Nguyễn Văn Giao**	Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh
33	TS. **Vũ Trung Tuyến**	Viện Nghiên cứu Cơ khí, Bộ Công Thương
34	TS. **Hoàng Trung Kiên**	
35	PGS,TS. **Lê Thanh Danh**	Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh
36	PGS,TS. **Nguyễn Dương Nam**	Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
37	TS. **Cao Ngọc Vi**	
38	TS. **Nguyễn Lan Hương**	
39	TS. **Võ Văn Biên**	Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự
40	TS. **Trương Minh Đức**	Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
41	TS. **Nguyễn Tường Vi**	
42	TS. **Nguyễn Thị Thảo**	
43	TS. **Nguyễn Trung Thiên**	
44	TS. **Nguyễn Quốc Toản**	
45	PGS,TS. **Đỗ Như Ý**	Trường Đại học Mỏ - Địa chất
46	TS. **Phạm Đức Thiên**	
47	TS. **Phạm Thị Thủy**	
48	TS. **Nguyễn Thạc Khánh**	
49	TS. **Hồ Việt Bun**	
50	TS. **Nguyễn Thiện Hoàng**	Trường Đại học Điện lực
51	TS. **Ngô Văn Thanh**	
52	TS. **Nguyễn Trường Giang**	
53	PGS,TS. **Đào Quang Kế**	Trường Đại học Hòa Bình
54	PGS,TS. **Nguyễn Trọng Hoan**	Trường Đại học Đại Nam
55	TS. **Nguyễn Trung Kiên**	
56	TS. **Đào Văn Dưỡng**	Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh
57	TS. **Nguyễn Minh Trí**	Trường Đại học Nguyễn Tất Thành
58	TS. **Trương Công Tiễn**	
59	TS. **Phan Thế Nhân**	Trường Cao đẳng Hàng hải II
60	TS. **Nguyễn Mạnh Cường**	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên
61	TS. **Lưu Anh Tùng**	
62	TS. **Đỗ Văn Tá**	Trường Đại học Nha Trang
63	TS. **Nguyễn Công Đoàn**	Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
64	TS. **Nguyễn Thành Thu**	
65	TS. **Lê Quang Thành**	Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí MInh
66	TS. **Nguyễn Thiết Lập**	Trường Đại học Giao thông vận tải
67	TS. **Nguyễn Tùng Lâm**	
68	TS. **Nguyễn Thị Cẩm Nhung**	Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC YẾU TỐ CÔNG NGHỆ TỚI ĐỘ NHÁM BỀ MẶT KHI GIA CÔNG TIA LỬA ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP XUNG ĐỊNH HÌNH

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON SURFACE ROUGHNESS IN ELECTRIC SPARK MACHINING BY PULSE SHAPING METHOD

PGS,TS. **Phan Văn Hiếu**
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: hieu.phanvan@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ tới độ nhám bề mặt khi gia công tia lửa điện bằng phương pháp xung định hình trên máy xung CM43-60CNCT-T4 (Đài Loan), Phòng Công nghệ CNC, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội. Từ kết quả nghiên cứu xây dựng phương trình thể hiện mối quan hệ giữa các yếu tố công nghệ và độ nhám bề mặt. Bằng thực nghiệm với thép C45, điện cực bằng đồng, đưa ra được hàm số phụ thuộc của nhám bề mặt vào các yếu tố công nghệ làm tài liệu tham khảo cho sinh viên, vận dụng làm bài tập thực hành tại Phòng Công nghệ CNC và đưa ra được quan điểm đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ đến độ nhám bề mặt, để từ đó tìm ra mức độ ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ nhằm giảm độ nhám bề mặt.

Bài báo xây dựng được hàm số phụ thuộc vào các yếu tố công nghệ với độ nhám bề mặt từ việc lựa chọn các thông số đầu vào cùng với việc sử dụng phương pháp hồi quy thực nghiệm, phương pháp bình phương nhỏ nhất và sử dụng phần mềm EXCELL, MATHLAB R6.5 để tính toán.

Từ khóa: *Độ nhám bề mặt; Xung định hình; Điện cực đồng; Điện áp khởi tạo; Thời gian kéo dài xung; Yếu tố công nghệ.*

ABSTRACT

The paper presents the influence of technological factors on surface roughness when machining electric sparks by the pulse shaping method on the CM43-60CNCT-T4 pulse machine (Taiwan) in the CNC technology department of Hanoi University of Industry. From the research results, an equation is built to show the relationship between technological factors and surface roughness. Through experiments with C45 steel and copper electrodes, the dependence function of surface roughness on technological factors is given as a reference for students, applied as practice exercises in the CNC technology department and given a viewpoint to evaluate the influence of some technological factors on surface roughness to find out the level of influence of technological factors to reduce surface roughness.

The paper constructs a function depending on technological factors with surface roughness from the selection of input parameters along with the use of empirical regression method, least square method and using EXCELL software, MATHLAB R6.5 for calculation.

Keywords: *Surface roughness; Shaping pulse; Copper electrode; Starting voltage; Pulse duration; Technology factor.*

1. GIỚI THIỆU

Gia công điện cực định hình là phương pháp có nhiều lợi thế trong gia công các vật liệu dẫn điện có tính siêu cứng, siêu bền, các biên dạng có hình dáng phức tạp. Đây là loại hình gia công chiếm tỷ trọng lớn, được dùng rộng rãi trong số các phương pháp gia công không truyền thống, là gia công không có lực cắt, không phụ thuộc vào độ cứng của vật liệu, gia công định hình các bề mặt bậc cao, do đó nó đã làm thay đổi một số biện pháp gia công truyền thống khi chế tạo các cụm máy phức tạp.

Đã có những nghiên cứu tối ưu trong thiết kế bộ điều khiển máy xung định hình nhưng tối ưu trong khai thác theo các hàm mục tiêu khác nhau thì chưa có đối với máy xung. Các máy xung hầu hết không có bảng tra chế độ cắt, người dùng thường phải cắt nhiều lần mới đạt độ bóng bề mặt theo yêu cầu kỹ thuật. Xây dựng và giải được bài toán độ nhám bề mặt phụ thuộc vào các yếu tố công nghệ khi gia công tia lửa điện bằng phương pháp xung định hình sẽ góp phần nâng cao chất lượng chi tiết, đặc biệt là khi gia công vật liệu có độ cứng rất cao với hình dạng bề mặt phức tạp và giải quyết được tất cả các vấn đề nêu trên. Vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ tới độ nhám bề mặt khi gia công tia lửa điện bằng phương pháp xung định hình trở thành vấn đề cấp thiết.

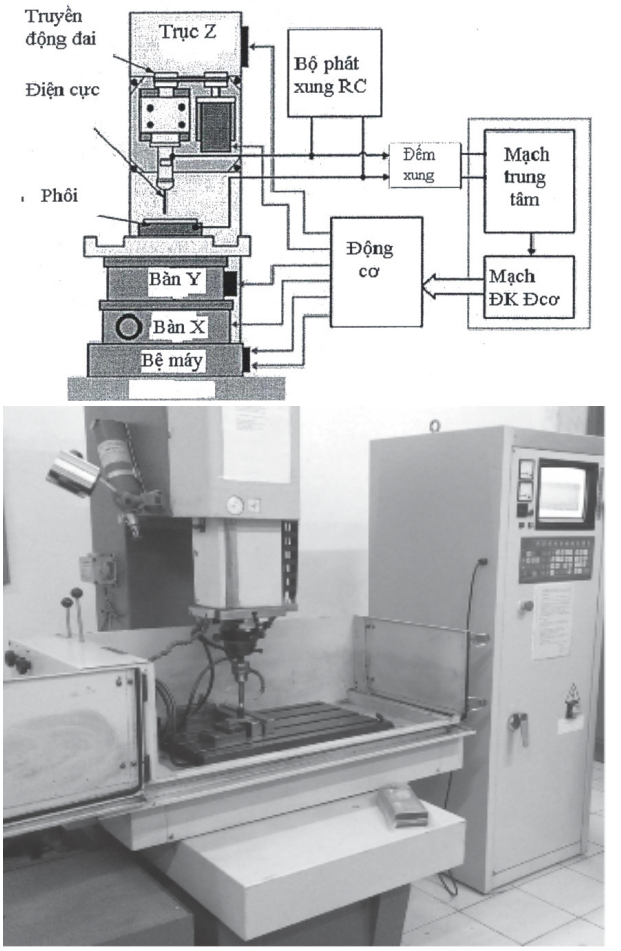
Cấu tạo của máy xung EDM

Máy xung định hình có 3 phần chính:

- Phần cơ khí (Khung máy tổng hợp; Thùng chất điện môi cho phôi; Bàn kẹp phôi; Hệ thống lắp điện cực và điện cực; Các bàn trượt và bàn quay để tạo các chuyển động cần thiết).

- Hệ thống tủ điện và điện tử điều khiển (Máy phát xung; Hệ thống điều khiển phóng tia lửa điện; Hệ thống điều khiển CNC).

- Cụm dung dịch điện môi.



Hình 1. Máy xung định hình CM43-60CNCT-T4 (Đài Loan)

Các phương pháp kế hoạch hóa thực nghiệm cực trị chủ yếu: Phương pháp bình phương cực tiểu, phương pháp đồng dạng của Bêlốp, phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu của Taguchi.

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm được chọn trong bài báo là phương pháp bình phương cực tiểu. ☞

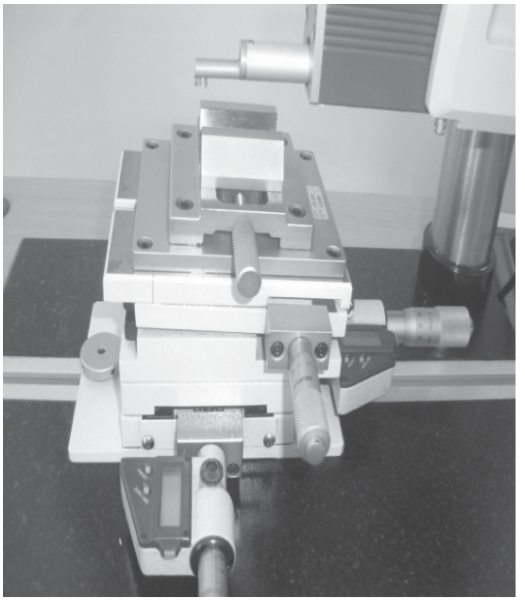
2. XÁC ĐỊNH MỐI QUAN HỆ GIỮA CÁC YẾU TỐ CÔNG NGHỆ VỚI ĐỘ NHÁM BỀ MẶT KHI GIA CÔNG TIA LỬA ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP XUNG ĐỊNH HÌNH

2.1. Điều kiện thực nghiệm

Thí nghiệm trên máy xung định hình CM43-60CNCT-T4 (Đài Loan) (Hình 1).

Điện cực bằng đồng có kích thước Φ30.
Điện áp U_1 = 160V.
Dung dịch điện môi là BP80.
Thông số công nghệ gồm:
t_{off} = 120, tw = 3, Hup = 7.5
(cho tất cả các thí nghiệm).
Cường độ dòng điện được giới hạn trong khoảng 3A đến 30A.

Các mẫu thép thí nghiệm được gửi sang đo độ nhám tại Phòng Đo lường chính xác của Bộ môn Thiết bị - Dụng cụ công nghiệp, Đại học Công nghiệp Hà Nội. Phép đo độ nhám được thực hiện trên máy chuyên dùng CNC SJ-400 của hãng MITUTOYO - Nhật Bản (Hình 2).



Hình 2. Máy đo độ nhám SJ-400 (Nhật Bản)

Đặc tính kỹ thuật của máy đo độ nhám JC-400.

Thang đo:
Ra/Rq/Rz/Ry/Rp/Rt/R3z/Rz/Rv/Sm/S/Pc/ mr/q/Wte/Wt/W/AW/ Δa/Δq/σc/Rpk/Rvk/Rk/ Mr1/Mr2/Lo/R/AR/Rx/A1/A2/Vo/Ppi/HSC/ mrd/sk/Ku/a;

Chiều dài tiêu chuẩn khi đo: 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8 mm;
Khoảng dịch chuyển tối đa: Trục X: 25mm, trục Z: 800mm;
Đầu đo loại tiếp xúc, lực đo: 0,75 N;
Loại đầu đo: Kim cương (R = 1 mm);
Tốc độ: 0.05; 0.1; 0.5; 2.0 mm/s khi đo;
Tiêu chuẩn về độ nhám: JIS,DIN,ISO, ANSI.

Đo các mẫu thử thí nghiệm trên máy đo SV-3000 do Nhật Bản sản xuất tại Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường và Chất lượng (Hình 3).



Hình 3. Máy đo độ nhám SV-3000 của Nhật Bản.

2.2. Xây dựng mô hình quy hoạch thực nghiệm

Về hệ thống công nghệ cần chọn các thành phần là: Điện cực, phôi, chất điện môi, các đồ gá chuyên dùng, máy xung định hình.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Về hệ thống thiết bị đo: Máy đo độ nhám bề mặt.

Về hệ thống xử lý số liệu cần có máy tính và các thiết bị ngoại vi.

Từ thí nghiệm có thể thấy độ nhám bề mặt phụ thuộc nhiều vào công suất gia công. Trong các thành phần I_e, t_{off} và U_e trong công thức xác định công suất thì thành phần I_e, t_{off} có ảnh hưởng lớn nhất tới độ lớn của độ nhám. Còn U_e thì nó không đổi với mỗi cặp điện cực xác định. Do đó, mô hình quy hoạch thực nghiệm xác định độ nhám bề mặt chi tiết gia công trên máy xung định hình EDM có thể viết được như sau:

$$R_a = f(I_e, t_{off}) \quad [1]$$

Ở đây chọn mô hình quy hoạch thực nghiệm có dạng sau:

$$R_a = k_1 . I_e^{k2} . t_{off}^{k3} \quad [2]$$

Các hệ số k_1, k_2, k_3 được xác định từ thực nghiệm.

2.3. Tiến hành thực nghiệm

Kiểm tra tình trạng máy, điện cực, phôi các đồ dùng liên quan… cho chạy rà 5 phút (cho hệ thống công nghệ định) trước khi tiến hành thí nghiệm. Số lượng thí nghiệm: 5 và số lượng biến N = 2.

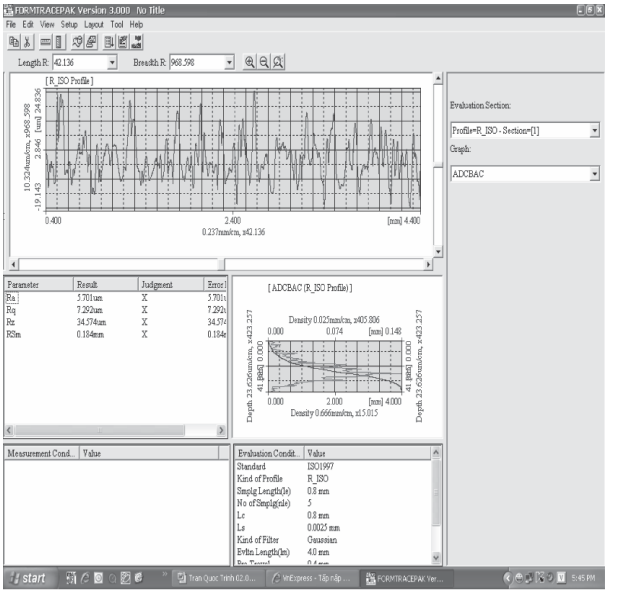
Thực nghiệm đo độ nhám Ra và kết quả.

Kết quả thí nghiệm các giá trị trong bảng 2.1.

Bảng 2.1. Giá trị các yếu tố trong thực nghiệm

TT	Cường độ dòng điện I_e (A)	Thời gian xung ti (µs)	Độ nhám Ra (µm)
1	27	80	6.32
2	18	180	4.15
3	12	220	3.45
4	6	300	3.12
5	3	320	2.93

Khi đo chỉ cần lấy thông số điển hình là Ra. Mẫu in kết quả của một phép đo được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Mẫu in kết quả của phép đo độ nhám

Kết thúc quá trình đo, ghi số liệu vào trong bảng 2.1.

2.4. Xử lý kết quả thực nghiệm

Xử lý số liệu theo phương pháp bình phương bé nhất.

Tính các sai số và kiểm nghiệm các hệ số tìm được. ☞

Kiểm tra các hệ số Ai tìm được có nghĩa hay không.

Mô hình quy hoạch phù hợp với các số liệu thí nghiệm và các hệ số Ai tìm được có nghĩa.

Thay các ký hiệu biến số vào [2], ta có được kết quả cuối cùng:

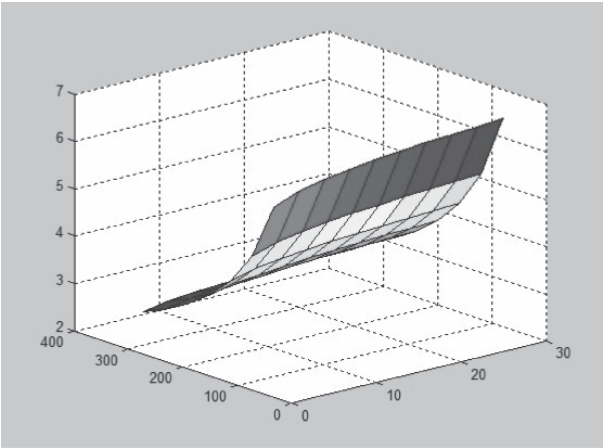
$$Ra = 66.53*I_e^{0.0491}*t_{off}^{-0.5723} \quad [3]$$

Trong nghiên cứu, miền xác định của công thức trên là:

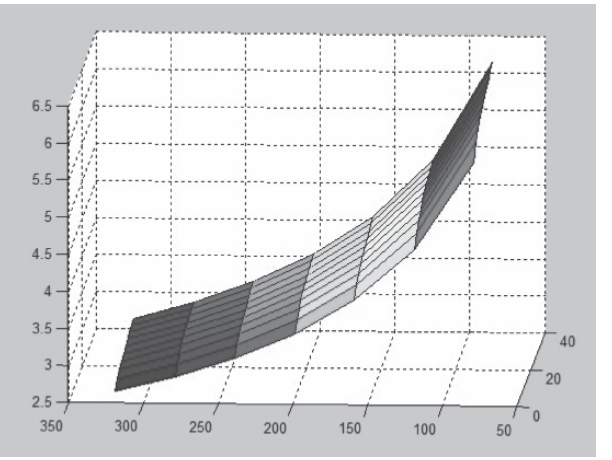
I_e = 3 … 30A; ti = 80 … 350µs; Vật liệu điện cực là đồng; Phôi là thép C45; Dung dịch điện môi PB80.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

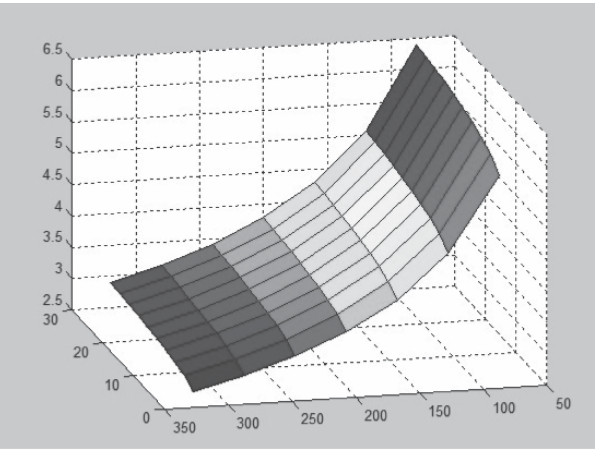
Từ kết quả thí nghiệm và công thức biểu diễn mối quan hệ giữa các yếu tố công nghệ và độ nhám bề mặt Ra, ta có nhận xét sau:



Hình 5. Quan hệ giữa độ nhám Ra với cường độ dòng điện I_e và thời gian xung t_{off}



Hình 6. Quan hệ giữa độ nhám Ra với cường độ dòng điện I_e và thời gian xung t_{off}



Hình 7. Quan hệ giữa độ nhám Ra với cường độ dòng điện I_e và thời gian xung t_{off}

Nhìn vào đồ thị, ta thấy rằng với giá trị I_e nhỏ và thời gian ngắt xung t_{off} lớn thì độ nhám Ra đạt giá trị nhỏ nhất. Điều này được giải thích như sau:

Khi xung với cường độ dòng điện nhỏ thì công suất xung $P = U_e*I_e$ sẽ nhỏ đi, do đó khả năng công phá bề mặt của các ion và các điện tử va đập vào bề mặt phôi bị giảm đi, khả năng ăn mòn bề mặt phôi bị giảm đi, hay nói cách khác là độ sâu của các miệng núi lửa sẽ bị giảm đi. Bên cạnh đó, khi I_e nhỏ thì nhiệt sinh ra trong kênh phóng điện khi xung cũng

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

sẽ bị giảm xuống và làm cho khả năng ăn mòn bề mặt phôi cũng được giảm xuống đáng kể. Kết quả là độ nhám bề mặt chi tiết gia công được giảm xuống. Còn khi I_e tăng lên khi I_e qua một mức giới hạn nào đó thì quá trình phóng điện càng trở lên mãnh liệt, do đó chiều sâu những hố ăn mòn tăng lên rất nhanh từ đó cho độ nhám bề mặt tăng lên.

Khi thời gian kéo lớn thì dung dịch điện môi được phục hồi gần như trở lại trạng thái ban đầu, do đó giúp cho sự phóng điện được ổn định hơn, do dung môi đã được phục hồi lại trạng thái cũ nên khả năng xảy ra hồ quang giảm xuống và đồng thời phần lớn lượng phôi bốc hơi sẽ được đẩy ra ngoài và ít có cơ hội bị hút trở lại bề mặt phôi và điện cực.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt Ra với các yếu tố công nghệ:

$Ra = 66.53*I_e^{0.0491}*t_{off}^{-0.5723}$. Từ nghiên cứu trên, một số kết luận được chỉ ra như sau:

1) Đánh giá ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ chủ yếu đến độ nhám bề mặt:

Điện áp khởi tạo U_i là yếu tố ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt, nó có mặt trong tất cả các phương trình hồi qui thực nghiệm, đóng góp theo tỷ lệ % trong hàm độ nhám tính theo Ra là 92,33%, tính theo R_z là 27%. Muốn có độ bóng cao cần chọn điện áp khởi tạo nhỏ.

Thời gian kéo dài xung điện có ảnh hưởng đến độ nhám nhưng không có mặt trong phương trình của hàm độ nhám Ra, cần chú ý nhiều trong quá trình gia công nếu quan tâm đến R_z vì nó đóng góp 58,28% vào sự ảnh hưởng.

2) Mô hình hóa ảnh hưởng của các tham số công nghệ đến độ nhám theo các chỉ tiêu Ra. $Ra = 66.53*I_e^{0.0491}*t_{off}^{-0.5723}$

3) Đề xuất một số biện pháp nâng cao độ bóng bề mặt khi xung định hình.

Cần làm sáng tỏ mối quan hệ giữa năng suất và chất lượng gia công, lập bảng tra chế độ gia công chi tiết cho nhiều loại điện cực, nhiều loại phôi.

Tuy vậy, đây chỉ là những kết quả bước đầu trong nghiên cứu về mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt với các yếu tố công nghệ, tạo tiền đề, cơ sở cho những nghiên cứu tiếp theo.

Ngày nhận bài: **31/03/2025**
Ngày phản biện: **17/04/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Trần Văn Địch (2016), "*Nghiên cứu độ chính xác gia công cơ khí bằng thực nghiệm*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[2]. Vũ Hoài Ân (2003), "*Gia công tia lửa điện*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[3]. Trần Văn Địch (2000), "*Công nghệ chế tạo máy CNC*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[4]. Trần Văn Địch, Ngô Trí Phúc, "*Sổ tay thép thế giới*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[5]. Tạ Ngọc Minh (2014), "*Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến chất lượng bề mặt trong gia công trên máy cắt dây tia lửa điện*". Luận văn cao học, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
[6]. Nguyễn Trọng Hùng, Phùng Xuân Sơn, "*Giáo trình thiết kế thực nghiệm trong chế tạo máy*". NXB. Xây Dựng.
[7]. Trần Văn Thắng, "*Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ đến chất lượng chi tiết được gia công bằng phương pháp tia lửa điện*". Luận văn cao học, Đại học Bách Khoa Hà Nội, 2007.
[8]. Phạm Ngọc Tuấn, Nguyễn Văn Tường (2007), "*Các phương pháp gia công đặc biệt*", NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
[9]. Bùi Minh Trí (2006), "*Xác suất thống kê và quy hoạch thực nghiệm*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.

THIẾT KẾ CHẾ TẠO BỘ CẤP PHÔI VÀ DẬP CÁNH QUẠT LY TÂM BÁN TỰ ĐỘNG DÙNG TRONG HỆ THỐNG HÚT BỤI VÀ SỢI THUỐC LÁ

DESIGN AND FABRICATION OF A SEMI-AUTOMATED FEEDING AND STAMPING SYSTEM FOR CENTRIFUGAL FAN BLADES USED IN TOBACCO DUST AND FIBER EXTRACTION SYSTEMS

Phạm Trọng Nhân*, Phùng Trí Công, Văn Ngọc Hiệp, Đỗ Huỳnh Nhật
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh
Email: ptnhan@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Trong các hệ thống hút bụi và sợi thuốc lá, cánh quạt hút ly tâm là bộ phận quan trọng, đòi hỏi độ bền cao, biên dạng khí động học chính xác và khả năng cân bằng tốt. Tuy nhiên, các sản phẩm chế tạo trong nước hiện nay thường có độ bền thấp và sai lệch lớn do sử dụng phương pháp chế tạo thủ công như hàn, tán hoặc đúc nguyên khối, dẫn đến năng suất thấp và khó đảm bảo chất lượng đồng đều. Trong khi đó, các cánh quạt nhập khẩu có chất lượng cao hơn nhưng giá thành rất cao, thời gian đặt hàng và vận chuyển kéo dài, gây tốn kém chi phí lưu kho và đầu tư ban đầu. Nghiên cứu này đề xuất một quy trình gia công bán tự động mới để chế tạo cánh quạt hút ly tâm có biên dạng phù hợp giúp cải thiện đáng kể độ chính xác hình học và độ bền so với phương pháp thủ công truyền thống. Kết quả nghiên cứu cho thấy với lực chấn trong khoảng 1620 – 14330 (N) cho ra sản phẩm đạt được độ tương thích biên dạng cao nhất với hệ số R bình phương hiệu chỉnh là 96,7% so với thiết kế tiêu chuẩn, điều này chứng tỏ độ tin cậy cao của quy trình đề xuất. Nhờ đó, phương pháp bán tự động không chỉ giúp tiết kiệm đáng kể chi phí chế tạo mà còn đảm bảo chất lượng và độ ổn định tương đương với sản phẩm nhập khẩu. Đây là một hướng đi đầy tiềm năng trong việc nội địa hóa sản xuất quạt ly tâm phục vụ nhu cầu trong nước.

Từ khóa: *Cánh quạt hút ly tâm; Hệ thống bán tự động.*

ABSTRACT

In industrial ventilation systems, centrifugal fan blades are critical components that require high durability, precise aerodynamic profiles, and good dynamic balance. However, domestically manufactured blades currently exhibit low durability and significant geometric deviations due to manual fabrication methods such as welding, riveting, or casting, which result in low productivity and inconsistent quality. In contrast, imported blades offer superior quality but come at a high cost, with long lead times and added expenses related to storage and initial investment. This study proposes a novel semi-automated manufacturing process for producing centrifugal fan blades with complex profiles, significantly improving geometric accuracy and durability compared to

traditional manual methods. The research results show that with an impact force ranging from 1620 to 14330 N, the fabricated products achieved the highest profile conformity, with an adjusted R-squared value of 96,7% compared to the standard design. This indicates the high reliability of the proposed semi-automated manufacturing process. As a result, the method not only significantly reduces production costs but also ensures product quality and stability comparable to imported components. This represents a highly promising approach toward the localization of centrifugal fan production to meet domestic industrial demands.

Keywords: *Centrifugal propeller; Semi-automated system.*

1. TỔNG QUAN

Đối với các hệ thống hút bụi và sợi trong công nghiệp, cánh quạt hút ly tâm là một trong những bộ phận quan trọng, đóng vai trò quyết định đến hiệu suất làm việc và độ ổn định của toàn bộ hệ thống [1-2]. Bên cạnh đó, để đảm nhiệm hiệu quả hoạt động, cánh quạt cần đáp ứng những yêu cầu khắt khe về độ bền cơ học, biên dạng khí động học chính xác và khả năng cân bằng động ở tốc độ cao [3]. Tuy nhiên, thực trạng hiện nay tại Việt Nam cho thấy phần lớn các cánh quạt đang được chế tạo bằng phương pháp thủ công như hàn từng cánh, tán thủ công hoặc đúc nguyên khối. Những phương pháp này mặc dù đơn giản và ít tốn chi phí đầu tư ban đầu nhưng lại gây ra nhiều vấn đề nghiêm trọng như sai số hình học lớn, độ đảo cao, và năng suất sản xuất thấp [4-5].

Trong bối cảnh các ngành công nghiệp trọng điểm như thực phẩm, điện tử, dược phẩm và xử lí môi trường ngày càng đòi hỏi thiết bị thông gió có chất lượng cao, việc sử dụng cánh quạt nhập khẩu đang trở nên phổ biến hơn [6]. Một nghiên cứu gần đây đã cho thấy rằng tại các quốc gia đang phát triển, trong đó có Việt Nam, tỷ lệ nhập khẩu các thiết bị quạt công nghiệp có xu hướng gia tăng rõ rệt trong thập kỷ qua do sự thiếu hụt công nghệ chế tạo chính xác trong nước [7]. Điều này phản ánh thực tế rằng các sản phẩm nội địa chưa đủ khả năng cạnh tranh về chất lượng, đặc biệt là trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác và độ tin cậy cao.

Sự phụ thuộc vào sản phẩm nhập khẩu không chỉ làm gia tăng chi phí và rủi ro trong chuỗi cung ứng mà còn hạn chế khả năng tự chủ công nghệ trong nước, như chi phí lưu kho cao, thời gian đặt hàng kéo dài dẫn đến không chủ động được nguồn cung [8]. Đặc biệt, trong bối cảnh chuỗi cung ứng toàn cầu đang bị gián đoạn bởi các yếu tố địa chính trị và biến đổi khí hậu, việc nội địa hóa các sản phẩm cơ khí quan trọng như cánh quạt hút ly tâm là một yêu cầu cấp bách [9]. Một số nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng việc ứng dụng các công nghệ hiện đại như cắt laser CNC, dập định hình bằng khuôn và tổ hợp tự động có thể giúp cải thiện đáng kể độ chính xác hình học và tính đồng đều của sản phẩm [10-12]. Điều này mở ra cơ hội lớn cho việc phát triển một quy trình chế tạo bán tự động, vừa giúp giảm chi phí sản xuất, vừa đảm bảo chất lượng tương đương hoặc tiệm cận với sản phẩm nhập khẩu. Nghiên cứu này nhằm đề xuất một quy trình bán tự động cho chế tạo cánh quạt hút ly tâm có biên dạng phức tạp, độ bền cao và khả năng cân bằng động tốt.

Quy trình đề xuất bao gồm ba công đoạn chính, bắt đầu từ việc cắt phôi bằng công nghệ laser CNC nhằm đảm bảo độ chính xác hình học, tạo hình biên dạng cánh bằng phương ☞

pháp dập khuôn và cố định liên kết bằng tán nhôm sử dụng súng hơi trên đồ gá chuyên dụng. Sản phẩm sau gia công được đánh giá thông qua việc đối chiếu biên dạng với bản vẽ thiết kế tiêu chuẩn, đo lường độ đảo trục và xác định chỉ số mất cân bằng động. Mục tiêu của nghiên cứu là xác lập tính khả thi và hiệu quả kỹ thuật của quy trình bán tự động này trong việc thay thế các sản phẩm nhập khẩu, từ đó thúc đẩy quá trình nội địa hóa các thiết bị công nghiệp trọng điểm.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan phương án

Nhóm tác giả đề xuất phương án sử dụng phương pháp gia công bán tự động bằng cách sử dụng phương pháp cắt laser CNC kết hợp chấn, uốn có thể tạo ra thành phẩm hàng loạt, rút ngắn được thời gian sản xuất, đạt các yêu cầu về chất lượng, chi phí sản xuất số lượng lớn được giảm xuống đáng kể, các máy gia công cũng là những máy phổ biến như Bảng 1.

Bảng 1. Các máy gia công sử dụng

Loại máy	**Tên Máy**
Máy Laser CNC	AMADA LC2415αIIINT
Máy chấn	SATEC 2294SV

2.2. Quy trình gia công

***Chọn vật liệu gia công**

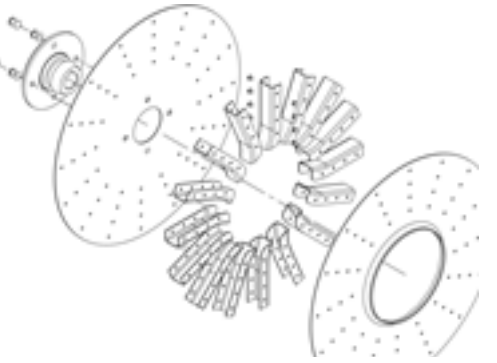
Nguyên liệu gia công cho cánh quạt được lựa chọn là Thép C45.

Bảng 2. Đặc tính Thép C45

Mác thép	Giới hạn chảy	Độ bền kéo	Độ giãn dài	Độ thắt	Độ dai va đập
	kg/mm^2		%		m/cm^2
	Không nhỏ hơn				
C45	36	61	16	40	5

***Chuẩn bị phôi cho cánh quạt**

Cánh quạt ly tâm được tạo ra bằng cách ghép các cánh quạt nhỏ nằm giữa 2 hình tròn lớn bằng các đinh tán. Sử dụng moay-ơ ở tâm quạt để truyền động cho quạt. Mô hình được thực hiện như Hình 1.



Hình 1. Mô hình cánh quạt ly tâm.

Như vậy, việc công tác chuẩn bị cho phôi sản phẩm bao gồm: 2 phôi thép lớn cho 2 vòng tròn đỡ cánh quạt, các tấm thép kích thước trung bình để gia các cánh quạt chữ U.

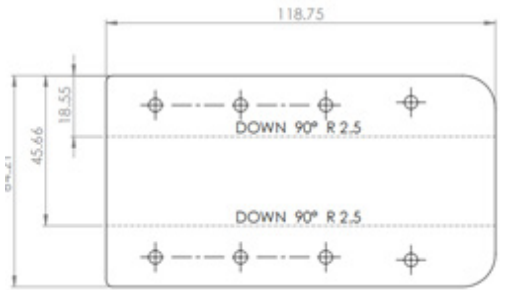
***Cắt phôi**

Chọn phôi là các tấm thép có độ dày yêu cầu như sau:

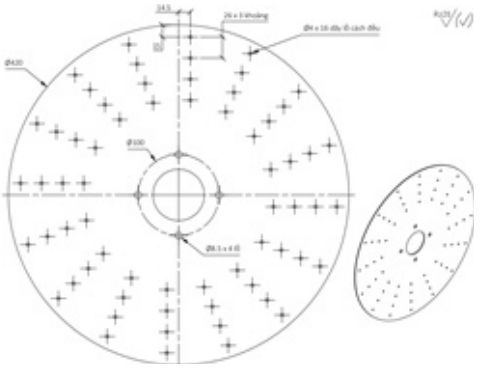
- Độ dày của cánh chữ U: 1,5 mm;
- Độ dày của đĩa cánh quạt: 2 mm.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Sau khi chọn phôi đạt yêu cầu, sử dụng máy cắt laser CNC để cắt phôi và tạo lỗ lắp cho phôi theo kích thước đã thiết kế để tạo ra thành phẩm có độ chính xác và tính đồng nhất giữa các sản phẩm.

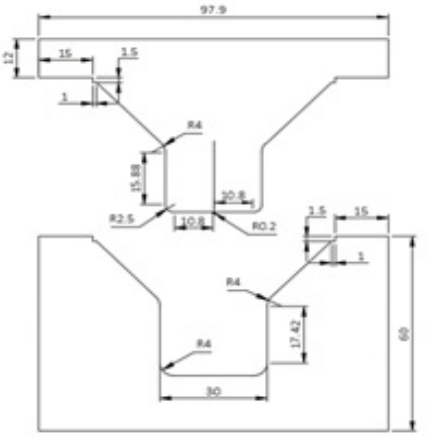


Hình 2. Biên dạng thiết kế của phôi cánh quạt



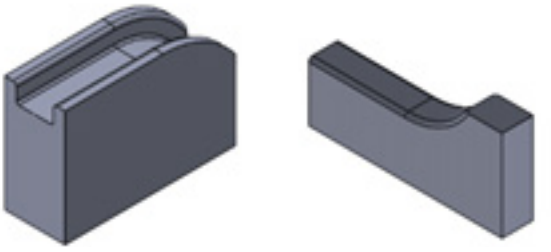
Hình 3. Biên dạng thiết kế của phôi đĩa quạt

***Tạo khuôn chấn**



Hình 4. Thiết kế của khuôn tạo hình cánh quạt

Cần gia công khuôn chấn để tạo ra hình dạng của cánh quạt: 1 khuôn tạo cánh quạt hình chữ U, 1 khuôn làm cong 1 đầu của phôi cánh quạt. Khuôn chấn được cắt bằng máy laser CNC.



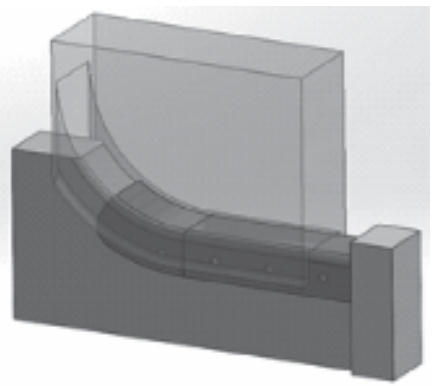
Hình 5. Thiết kế của khuôn uốn cong cánh quạt

***Gia công cánh quạt thành dạng chữ U**

Cánh quạt được chuẩn bị ở bước 3 sẽ được sử dụng để tạo dạng hình chữ U. Cánh quạt được đặt vào khuôn cố định, máy chấn sẽ ép phôi xuống để tạo ra biên dạng chữ U cho cánh quạt. Lực chấn để tạo hình của quá trình sẽ tăng dần từ 1620 – 14430 (N).

***Gia công cánh quạt chữ U được uốn cong một đầu**

Gá phôi chữ U sau khi chấn lên phần cố định của khuôn uốn cong, máy chấn tạo lực ép lên phôi để cánh quạt để có biên dạng cong ở đuôi như hình sau:



Hình 6. Gia công uốn cong cánh quạt

Gắn cánh quạt với tấm đỡ quạt

Cánh quạt được gắn với 2 tấm đỡ quạt hình tròn bằng đinh tán, sử dụng súng hơi để đinh được cố định chắc chắn, các cánh quạt được bố trí hình tròn quanh tâm quạt.

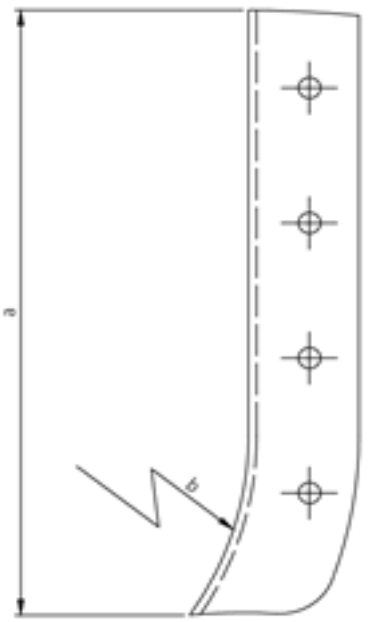


Hình 7. Cánh quạt hoàn thiện

3. KẾT QUẢ ĐO KIỂM VÀ THẢO LUẬN

Sau khi hoàn tất quá trình chế tạo theo quy trình bán tự động mà nhóm nghiên cứu đã đề xuất, tổng cộng 6 cụm sản phẩm đã được gia công thành công, trong đó mỗi cụm bao gồm 5 cánh quạt được lắp ráp và hoàn thiện đồng bộ.

Nhằm đánh giá mức độ chính xác và tính khả thi của quy trình chế tạo, nhóm tác giả đã tiến hành đối chiếu kích thước hình học của sản phẩm so với bản vẽ tiêu chuẩn bằng thiết bị đo biên dạng Mitutoyo Beyond A504, trả về dữ liệu tập hợp tọa độ các điểm của biên dạng và dùng phần mềm Matlab để kiểm tra, phân tích số liệu. Dữ liệu thu được từ quá trình đo đã được tổng hợp và phân tích để xác định sai số hình học, độ lệch kích thước và mức độ đồng đều giữa các sản phẩm trong cùng một lô. Từ đó, nhóm nghiên cứu có cơ sở để đánh giá độ chính xác trong gia công cũng như tính ổn định của quy trình chế tạo đã đề xuất. Kết quả ban đầu cho thấy các sai số kích thước nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn thiết kế, chứng minh tính ổn định và hiệu quả của quy trình trong điều kiện sản xuất thực tế.



Hình 8. Kích thước tiêu chuẩn cánh quạt hút ly tâm

Chú thích cho các bảng đánh giá:

MSE: Mean Squared Error;
PE: Percentage Error (%);
ME: Max Error (mm);
RS: R-Squared;
ARS: Adjusted R-Squared.

Bảng 3. Bảng đánh giá sản phẩm lô A

Sản phẩm	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5
MSE	0,483	0,787	1,462	0,623	0,179
PE	0,893	1,049	1,779	1,241	0,733
ME	1,956	2,495	3,160	2,155	1,129
RS	0,851	0,772	0,658	0,796	0,919
ARS	0,850	0,771	0,656	0,795	0,918

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Bảng 4. Bảng đánh giá sản phẩm lô B

Sản phẩm	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5
MSE	0,252	0,275	0,116	0,111	0,137
PE	0,623	0,875	0,615	0,595	0,734
ME	1,466	1,411	0,829	0,826	0,922
RS	0,892	0,876	0,942	0,940	0,914
ARS	0,891	0,876	0,942	0,940	0,913

Bảng 5. Bảng đánh giá sản phẩm lô C

Sản phẩm	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5
MSE	0,204	0,333	0,203	0,517	0,217
PE	0,711	0,818	0,485	0,948	0,722
ME	2,246	2,809	2,463	3,379	2,263
RS	0,677	0,718	0,683	0,745	0,709
ARS	0,676	0,701	0,681	0,728	0,708

Bảng 6. Bảng đánh giá sản phẩm lô D

Sản phẩm	D.1	D.2	D.3	D.4	D.5
MSE	1,360	1,017	1,188	0,866	1,994
PE	1,084	1,026	1,156	1,134	1,621
ME	3,274	2,868	3,091	2,499	3,666
RS	0,701	0,752	0,730	0,769	0,640
ARS	0,699	0,751	0,729	0,768	0,638

Bảng 7. Bảng đánh giá sản phẩm lô E

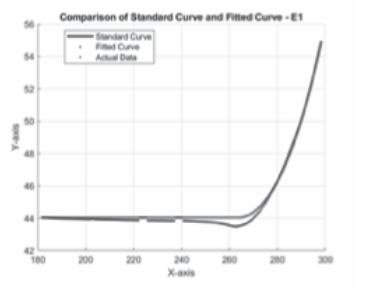
Sản phẩm	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5
MSE	0,053	0,292	0,361	0,820	1,071
PE	0,431	0,686	0,917	1,313	1,158
ME	0,548	1,580	1,772	2,509	2,678
RS	0,967	0,890	0,832	0,779	0,745
ARS	0,966	0,890	0,831	0,778	0,744

Bảng 8. Bảng đánh giá sản phẩm lô F

Sản phẩm	F.1	F.2	F.3	F.4	F.5
MSE	0,082	0,141	0,082	0,121	0,140
PE	0,522	0,666	0,513	0,633	0,642
ME	1,135	1,080	0,916	1,076	1,486
RS	0,933	0,906	0,938	0,905	0,860
ARS	0,933	0,906	0,938	0,905	0,859

4. KẾT LUẬN

Kết quả đánh giá độ chính xác kích thước sản phẩm theo các tiêu chí định lượng như MSE (Mean Squared Error), PE (Percentage Error), ME (Max Error) và ARS (Adjusted R-Squared) cho thấy độ sai lệch giữa sản phẩm thực tế và kích thước thiết kế là rất nhỏ, đồng thời tính nhất quán trong gia công đạt mức cao. Cụ thể, giá trị MSE ở mức thấp chứng tỏ độ phân tán sai số không đáng kể, phản ánh chất lượng gia công ổn định. Chỉ số PE dao động trong ngưỡng cho phép, thể hiện sự chính xác tương đối giữa sản phẩm thực tế và thông số thiết kế ban đầu. Đặc biệt, giá trị ME thấp chứng minh rằng sai số cực đại của từng cụm sản phẩm đều nằm trong phạm vi kiểm soát, đảm bảo độ an toàn khi lắp ghép và vận hành. Bên cạnh đó, hệ số ARS cao cho thấy sự tương thích tốt giữa dữ liệu đo được và mô hình thiết kế lý thuyết, đồng thời khẳng định độ tin cậy cao của quá trình chế tạo.



Hình 9. Đồ thị đánh giá độ tương thích biên dạng sản phẩm và biên dạng chuẩn

Tiếp theo, để đánh giá khả năng cân bằng động của các cụm cánh quạt, nhóm nghiên cứu tiến hành kiểm tra theo sáng chế (VN)1-2014-03890: Dynamic Balancing System for Rotating [13] của PTN Tàu thủy, Trường ĐH Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh. Kết quả cho thấy quy trình bán tự động đã giảm trung bình mức mất cân bằng ban đầu từ 7,87 g xuống 5,55 g (giảm khoảng 30 %), với ba cụm đạt dưới 5 g, cho thấy độ đồng đều và độ tin cậy cao.

Bảng 9. Bảng so sánh mất cân bằng động giữa Phương pháp cũ và Phương pháp được nhóm tác giả đề xuất

Số thứ tự	Chỉ số mất cân bằng động trước khi cân cánh cũ	Chỉ số mất cân bằng động trước khi cân cánh mới
1	Bị đảo không cân bằng được	3,54g@208°
2	6,43g@35°	7,95g@100°
3	6,17g@221°	7,97g@92°
4	7,34g@319°	4,4g@175°
5	8,17g@259°	5,18g@176°
6	11,22g@268°	4,25g@218°

Tổng thể, việc sử dụng đồng thời các chỉ tiêu này không chỉ giúp đánh giá toàn diện mức độ chính xác và ổn định của quy trình, mà còn minh chứng cho tiềm năng ứng dụng thực tiễn của phương pháp gia công bán tự động trong sản xuất cánh quạt công nghiệp có yêu cầu cao về độ chính xác và tính đồng đều sản phẩm. Chi tiết cánh quạt này đã được đưa vào vận hành thực tế tại nhà máy của Công ty Thuốc lá Sài Gòn. Như vậy, nhóm tác giả đã đề xuất được và kiểm chứng một quy trình gia công mới giúp đạt được biên dạng có chỉ số tương đồng 96,7% với chi tiết nhập khẩu. Bên cạnh đó, chế độ gia công áp lực tối ưu lên chi tiết cũng đã được khảo sát nhằm phục vụ cho những cải tiến tiếp theo trong tương lai.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài NCKH cấp Trường trong khuôn khổ đề tài mã số T-CK-2023-02. Nhóm tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ phương tiện và cơ sở vật chất cho đề tài này.❖

Ngày nhận bài: **15/4/2025**
Ngày phản biện: **27/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Zhou S., Yang K., Zhang W., Zhang K., Wang C., Jin W., "*Optimization of Multi-Blade Centrifugal Fan Blade Design for Ventilation and Air-Conditioning System Based on Disturbance CST Function*". Applied Sciences, MDPI, Basel, Switzerland, 2021.

[2]. Choi H. và Kim D., "*Dynamic balancing of centrifugal impellers: Methods and practical challenges*". International Journal of Rotating Machinery, Vol. 26, No. 2, pp. 85-94, 2020.

[3]. Nguyễn Đăng Tấn, Kiều Đức Thịnh, Trần Viết Linh, "*Mô phỏng ảnh hưởng của góc đặt và góc xoắn cánh quạt gió cục bộ dùng trong mỏ than hầm lò*". Trường Đại học Thủy lợi, 2022.

[4]. Nguyễn Văn Lại, "*Xây dựng mô hình và mô phỏng tổn thất lưu lượng trong máy thủy lực một trục vít*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 2023.

[5]. Nguyễn Hữu Lộc, "*Phân tích và đánh giá cân bằng động rôto trên gối đỡ cứng và gối đỡ mềm*". Kỷ yếu Hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về Cơ khí lần thứ V, 2018.

[6]. ASEAN Market Insight Group, "*Demand trends in HVAC and air movement systems in Southeast Asia*". ASEAN Industrial Outlook, Singapore, 2023.

[7]. Ali H., Asif M., Uddin S., "*Performance evaluation of centrifugal fans used in industrial ventilation systems*". International Journal of Energy and Mechanical Engineering, Lahore: IJEME Press, 2020.

[8]. McKinsey Global Institute, "*Risk, resilience, and rebalancing in global supply chains*". McKinsey & Co., New York, 2021.

[9]. World Bank Group, "*Viet Nam 2045: Trading Up in a Changing World*". Washington D.C., 2022.

[10]. Jin X., Zhang Y., và Li H., "*Application of CNC machining in the manufacturing of high-performance centrifugal impellers*". Journal of Manufacturing Processes, Elsevier, Amsterdam, Vol. 64, pp. 201-210, 2021.

[11]. Chen L., Li M., Yang X., "*The feasibility of fast slotting thick CFRP laminate using fiber laser-CNC milling cooperative machining technique*". Optics & Laser Technology, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2022.

[12]. Feldmann S., Herzig S.J.I., Kernschmidt K., Wolfenstetter T., Kammerl D., Qamar A., Lindemann U., Krcmar H., Paredis C.J.J., Vogel-Heuser B., "*Towards Effective Management of Inconsistencies in Model-Based Engineering of Automated Production Systems*". IFAC-PapersOnLine, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2015.

[13]. Lê Đình Tuân, "*Thiết bị cân bằng động chi tiết quay*". Sáng chế độc quyền VN 1-2014-03890, Cục Sở hữu trí tuệ Việt Nam, cấp ngày 25/05/2016.

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG DÒNG CHẢY NHỰA BẰNG PHẦN MỀM NX: SO SÁNH CỔNG PIN POINT VÀ SIDE GATE

STUDY ON PLASTIC FLOW SIMULATION USING NX SOFTWARE: COMPARISON OF PIN POINT GATE AND SIDE GATE

Trương Chí Công*, Trần Quang Giang, Chu Văn Hiếu, Vũ Trọng Nam, Nguyễn Việt Anh
Trường Cơ khí – Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
**Email: truongchicong@haui.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng dòng chảy nhựa của một chi tiết mẫu trên phần mềm NX EasyFill (công nghệ Moldex3D) với hai phương án cổng phun khác nhau: cổng điểm (Pin Point Gate) ở trung tâm sản phẩm và cổng cạnh (Side Gate) ở rìa sản phẩm. Kết quả mô phỏng cho thấy phương án Side Gate cho thời gian điền đầy ngắn hơn (0,65 s so với 0,76 s) nhưng đòi hỏi áp suất phun lớn hơn (khoảng 81,7 MPa so với 49,4 MPa), đồng thời dẫn tới dòng chảy lệch và ứng suất trượt cao hơn. Trong khi đó, phương án Pin Point Gate mang lại dòng chảy cân bằng hơn và tổn hao nhựa tối thiểu, nhưng gây xuất hiện vết phun ở mặt sản phẩm và nguy cơ nghẹt khí trên bề mặt. Dựa trên phân tích ưu nhược điểm, nhóm nghiên cứu chọn phương án Side Gate để đảm bảo tính thẩm mỹ sản phẩm.

Từ khóa: *NX EasyFill; Mô phỏng dòng chảy nhựa; Cổng phun Pin Point; Cổng phun Side Gate; Đặc tính vật liệu nhựa.*

ABSTRACT

The article presents the results of plastic flow simulation of a sample part on NX EasyFill software (Modex3D technology) with two different injection gate options: Pin Point Gate in the center of the product and Side Gate at the edge of the product. The simulation results show that the Side Gate option gives a shorter filling time (0.65s vs. 0.76s) but requires a larger injection pressure (about 81.7MPa vs. 49.4MPa), and also leads to a skewed flow and higher shear stress. Mean while, the Pin Point Gate option provides a more balanced flow and minimal plastic loss, but causes spray marks on the product surface and the risk of air blockage on the surface. Based on the analysis of advantages and disadvantages, the research team chose the Side Gate option to ensure the aesthetics of the product.

Keywords: *NX EasyFill; Plastic flow simulation; Pin Point gate; Side Gate; Plastic material properties.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

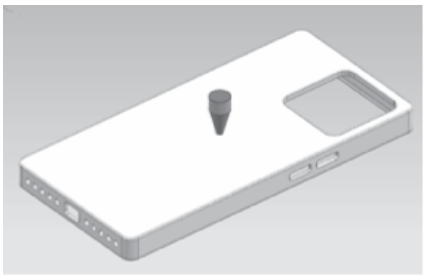
Ép phun (injection molding) là một trong những phương pháp chế tạo sản phẩm nhựa phổ biến nhất trong công nghiệp, đòi hỏi quy trình thiết kế khuôn và lựa chọn thông số phức tạp. Việc bố trí cổng phun hợp lý và tối ưu hóa thông số công nghệ là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng sản phẩm nhựa, bao gồm độ đầy khuôn, tạp chất đường hàn (weld line), nghẹt khí (air trap), và ứng suất dư. Phần mềm mô phỏng dòng chảy nhựa (mold flow simulation) là công cụ hỗ trợ đắc lực trong quá trình thiết kế khuôn, giúp dự đoán trước các khuyết tật tiềm ẩn và tối ưu vị trí cổng phun mà không cần phải thử nghiệm vật lý tốn kém. Theo Narowski và Wilczyński [1, 2], chất lượng kết quả mô phỏng phụ thuộc rất mạnh vào dữ liệu đầu vào về vật liệu và thông số quá trình.

Phần mềm Siemens NX cung cấp module EasyFill tích hợp để mô phỏng dòng chảy nhựa ngay trong môi trường thiết kế CAD. NX EasyFill cho phép tạo lưới tự động 3D từ mô hình CAD [3, 4, 5], sử dụng thư viện vật liệu nhựa phong phú (hơn 5000 loại) và mô phỏng đa cửa cổng một cách trực quan. Phần mềm này hỗ trợ đánh giá các hiện tượng như hoàn thành khuôn, áp suất ép, nhiệt độ phôi, đường hàn và nghẹt khí. Bài báo này trình bày kết quả mô phỏng của một chi tiết nhựa (mẫu ốp điện thoại) với hai vị trí cổng phun: cổng điểm ở trung tâm và cổng cạnh ở rìa. Sau khi phân tích kết quả: thời gian đầy, áp suất phun, vị trí đường hàn/nghẹt khí, nhiệt độ bề mặt, ứng suất trượt, các tác giả đã so sánh ưu, nhược điểm của hai phương án.

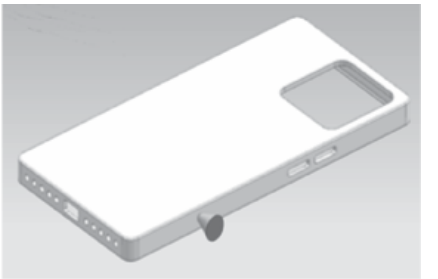
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

NX EasyFill cho phép người thiết kế dễ dàng thiết lập mô phỏng chỉ với một vài thao tác, đồng thời hỗ trợ đánh giá các lỗi gia công thông qua mô phỏng và trực quan hóa dòng chảy nhựa. Nhờ tích hợp chặt với NX, phương pháp này giúp nhanh chóng xác định các khuyết tật tiềm ẩn như short-shot, air trap, weld line và cũng cho phép tối ưu hóa vị trí cổng, thông số phun sớm trong giai đoạn thiết kế. Để đảm bảo tính khách quan, các kết quả mô phỏng được đối chiếu theo tiêu chí kỹ thuật (fill time, gate pressure, melt front temperature, v.v.) cho từng phương án.

Mô hình thử nghiệm được lập trên phần mềm NX với module EasyFill Analysis (công nghệ Moldex3D), sử dụng mô hình CAD chi tiết sản phẩm mẫu ốp điện thoại. Quy trình mô phỏng gồm việc lựa chọn vật liệu nhựa, cổng phun (gate) và các thông số phun ép tiêu chuẩn. NX EasyFill tự động tạo lưới 3D từ mô hình CAD mà không cần thao tác chuyển đổi thủ công, đồng thời cung cấp thư viện vật liệu lớn để chọn (cụ thể các thông số lưu biến, nhiệt của vật liệu.



Hình 1. Pin Point Gate đặt tại trung tâm mặt đúc

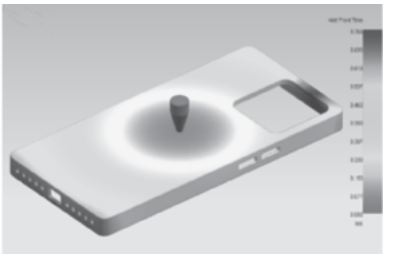


Hình 2. Side Gate đặt ở cạnh sản phẩm

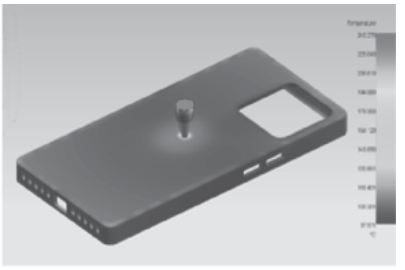
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Trong nội dung nghiên cứu này, các tác giả đã thiết lập hai phương án vị trí cổng: (1) Pin Point Gate đặt tại trung tâm mặt đúc (Hình 1); (2) Side Gate đặt ở cạnh sản phẩm (Hình 2). Các điều kiện vận hành như nhiệt độ nóng chảy (gần 240°C), nhiệt độ khuôn (80-100°C) và áp suất phun được giả định giống nhau giữa hai phương án để so sánh tương đối. Sau khi chạy mô phỏng lấp đầy (fill analysis), phần mềm thu thập kết quả các chỉ tiêu: thời gian điền đầy, áp suất tại cổng, nhiệt độ bề mặt sản phẩm khi đầy khuôn, vị trí tiềm ẩn xảy ra nghẹt khí và đường hàn, cũng như ứng suất trượt cực đại trong quá trình đẩy đầy.

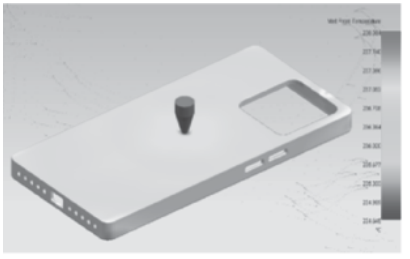
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG



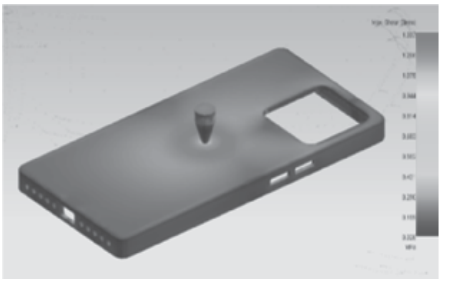
Hình 3. Thời gian điền đầy



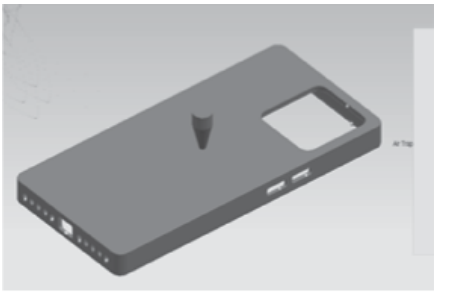
Hình 4. Nhiệt độ bề mặt khi điền đầy



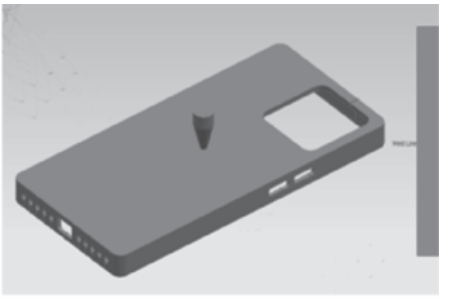
Hình 5. Nhiệt độ khi phun ở mặt trước



Hình 6. Ứng suất trượt tại thời điểm phun



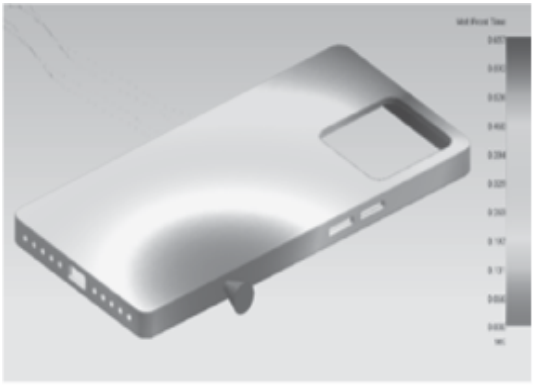
Hình 7. Vị trí nghẹt khí



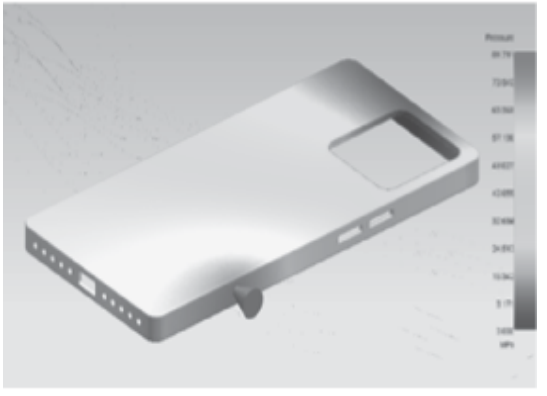
Hình 8. Vị trí đường hàn xuất hiện

• Phương án 1 – Pin Point Gate: Vị trí cổng phun ở giữa sản phẩm dẫn tới đường đi của dòng chảy dàn đều tới các góc. Kết quả cho thấy thời gian điền đầy khuôn khoảng 0,76 s (Hình 3), áp suất phun tại cổng khoảng 49,38 MPa, nhiệt độ bề mặt sản phẩm khi đầy khoảng 87 °C (Hình 4) và nhiệt độ nhựa khi phun ở mặt trước sản phẩm là 235-237 °C (Hình 5). Ứng suất trượt cực đại trong sản phẩm tại thời điểm phun khoảng 0,03-0,40 MPa (Hình 6). Mô phỏng cũng nhận diện vị trí tiềm ẩn xảy ra nghẹt khí ở gần mặt trên (Hình 7) và đường hàn xuất hiện đối xứng xung quanh trung tâm sản phẩm (Hình 8). Ưu điểm của phương án này là ☞

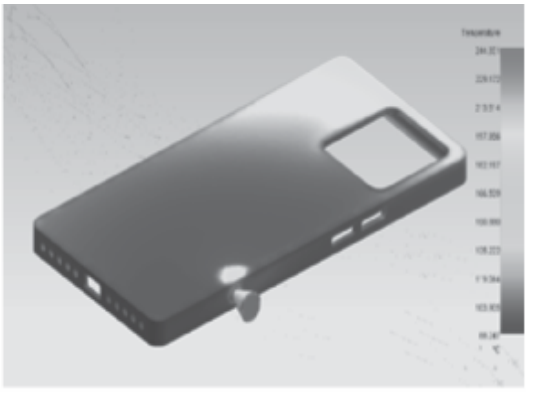
luồng chảy nhựa được điền đầy cân bằng (các góc sản phẩm đầy cùng lúc), kênh dẫn ngắn và hiệu quả vật liệu cao; nhược điểm là đầu phun nằm ở trung tâm mặt sản phẩm, đồng thời có nguy cơ xuất hiện khuyết tật nghẹt khí trên bề mặt (Hình 7).



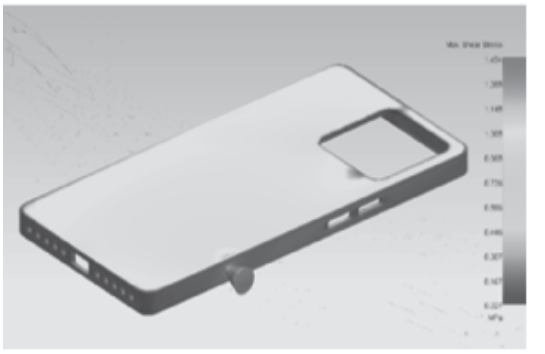
Hình 9. Thời gian điền đầy



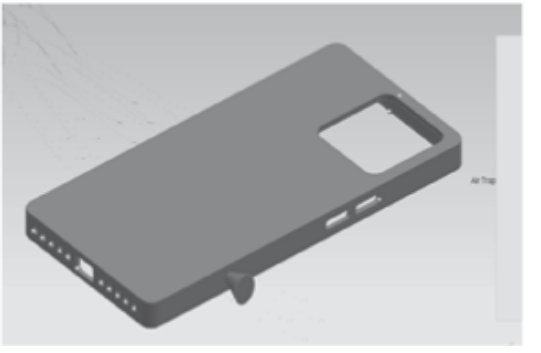
Hình 10. Áp suất trên bề mặt sản phẩm



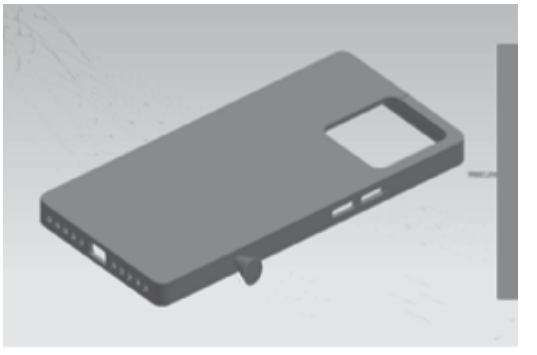
Hình 11. Nhiệt độ bề mặt khi điền đầy



Hình 12. Ứng suất trượt tại thời điểm phun



Hình 13. Vị trí nghẹt khí



Hình 14. Vị trí đường hàn xuất hiện

• Phương án 2 – Side Gate: Vị trí cổng phun ở cạnh sản phẩm tạo luồng chảy lệch về một phía. Thời gian điền đầy giảm xuống 0,65 s (Hình 9), nhanh hơn phương án 1 do khoảng cách ngắn đến các vùng sản phẩm; tuy nhiên áp suất cần thiết tăng lên khoảng 81,71 MPa (Hình 10). Nhiệt độ bề mặt khi đầy đạt 120 °C (Hình 11), lớn hơn đáng kể so với phương án 1, chỉ ra rằng nhiệt độ nhựa cao hơn và dòng chảy bất

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

cân bằng gây ma sát nhiệt cao hơn. Ứng suất trượt cực đại lên tới 0,50 MPa (Hình 12), cao hơn phương án Pin Point do gradient áp suất lớn. Hình ảnh mô phỏng cho thấy các khuyết tật nghẹt khí được gom về khu vực cuối luồng ở phần lưng sản phẩm (Hình 13), không xuất hiện trên mặt ngoài; đường hàn có xu hướng lệch một phía. Ưu điểm của Side Gate là khắc phục được vấn đề vết phun ở mặt chính của sản phẩm và hạn chế khí bị kẹt ở mặt quan sát được. Nhược điểm là dòng chảy không cân bằng, cần áp suất phun lớn và có thể tạo ra đường hàn không đối xứng (Hình 14).

So sánh giữa hai phương án: phương án Pin Point Gate yêu cầu áp suất thấp hơn và kinh tế tốt hơn (ít hao hụt vật liệu runner hơn), cho luồng chảy cân bằng hơn, tuy nhiên lại để lại vết phun ở chính giữa sản phẩm. Ngược lại, Side Gate rút ngắn thời gian phun nhưng đòi hỏi áp suất phun cao hơn và dòng chảy lệch, đồng thời dòng khí kẹt được gom về phía mặt sau sản phẩm đem lại tính thẩm mĩ cho sản phẩm. Căn cứ kết quả mô phỏng và các tiêu chí thẩm mỹ, nhóm nghiên cứu quyết định ưu tiên phương án Side Gate để đảm bảo tính thẩm mĩ của sản phẩm.

4. THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng cho thấy rõ sự đánh đổi giữa hai giải pháp cổng phun. Về thời gian điền đầy, Side Gate giúp giảm khoảng 14 % thời gian so với Pin Point, nhờ luồng phun ngắn hơn. Tuy nhiên, áp suất phun yêu cầu tăng cao (tăng xấp xỉ 65 %) cho thấy Side Gate tạo ra dòng chảy bất cân đối, cần lực đẩy lớn hơn. Áp suất phun cao có thể dẫn đến hao mòn khuôn nhanh hơn và tiêu tốn năng lượng hơn. Đối với nghẹt khí (air trap) và đường hàn (weld line), NX EasyFill có khả năng xác định và đánh giá các vùng này trong quá trình đẩy đầy. Mô phỏng cho thấy cổng tâm dễ tạo đường hàn đối xứng và khí kẹt trên mặt quay ra, trong khi cổng cạnh gom khí về phía lưng sản phẩm, do đó không gây lỗi nhìn thấy trên bề mặt chính. Điều này cho thấy Side Gate có ưu thế về ngoại quan, mặc dù kỹ thuật không tối ưu bằng. Nhiệt độ bề mặt sản phẩm cao hơn rõ rệt trong phương án Side Gate (120 °C so với 87 °C) cho thấy dòng chảy cao nhiệt và ma sát lớn hơn khi luồng nhựa di chuyển sâu vào khuôn. Sự khác biệt này có thể ảnh hưởng đến đặc tính cơ lý của vật liệu và thời gian làm nguội (cooling). Cuối cùng, ứng suất trượt (shear stress) cực đại có xu hướng cao hơn ở Side Gate (0,50 vs 0,40 MPa), do gradient áp suất lớn hơn, điều này có thể khiến bề mặt sản phẩm dễ bị phồng rộp hoặc tạo vết mòn.

Pin Point Gate có ưu thế về mặt kỹ thuật (flow cân bằng, áp suất thấp, chi phí thấp) nhưng bất lợi về thẩm mỹ (xuất hiện vết phun ngay trung tâm). Side Gate ngược lại đạt thẩm mỹ cao nhưng phải đánh đổi với áp suất và ứng suất lớn hơn. Kết quả này tương tự với nhận xét trong tài liệu: áp suất phun của cổng tâm ít hơn cổng cạnh và có lợi hơn về kinh tế, tuy nhiên cổng ở tâm để lại vết phun ảnh hưởng đến tính thẩm mĩ. Do vậy, trong trường hợp sản phẩm yêu cầu tính thẩm mĩ, Side Gate là lựa chọn thích hợp hơn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phân tích chi tiết hai phương án bố trí cổng phun cho một chi tiết nhựa trên phần mềm NX EasyFill. Kết quả mô phỏng cho thấy phương án Pin Point Gate tạo ra dòng chảy cân bằng với áp suất phun thấp và ít hao hụt vật liệu, nhưng nhược điểm là để lại vết phun ở tâm sản phẩm và tiềm ẩn hiện tượng nghẹt khí mặt ngoài. Trong khi đó, Side Gate rút ngắn được thời gian điền đầy và ẩn được ☞

khuyết tật khí, tuy nhiên đòi hỏi áp suất cao hơn và dòng chảy bị lệch. Căn cứ các tiêu chí trên, nhóm nghiên cứu lựa chọn Side Gate để tối ưu tính thẩm mĩ của sản phẩm.❖

Ngày nhận bài: **09/4/2025**
Ngày phản biện: **28/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Narowski, P., Wilczyński, K. (2010), "*Simulation of Polymer Injection Molding: A New Practical Approach to Improve Computation Accuracy*". Nanotechnologies and Materials, pp.25-28.

[2]. Przemysław Narowski and Krzysztof Wilczy´nski (2024), "*A Global Approach to Modeling Injection Molding*". Polymers 16.147.

[3]. Nguyễn Thị Hiên, Hoàng Long (2023), "*Ứng dụng phần mềm Moldflow trong mô phỏng quá trình ép phun nhựa*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ năng lượng, Trường Đại học Điện lực (ISSN: 1859 - 4557), Số 32, pp.53-61.

[4]. Vijaykumar V.A. and S.R. Dulange (2017), "*Injection molding methods design, optimization, simulation of plastic flow reducer part by mold flow analysis*". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 4(06), pp.1742-1746.

[5]. Siemens PLM Software & CoreTech/ Moldex3D (2012), "*NX™ EasyFill Analysis - Mold Flow Analysis for Plastic Part Designers*" (Fact Sheet). https://www.moldex3d.com/assets/2012/12/Siemens-PLM-NX-EasyFill-Analysis-fs-X13.pdf

THIẾT KẾ CHẾ TẠO BỘ PHẬN VẬN CHUYỂN CÂY GIỐNG TRONG MÁY TRỒNG CHUỐI NUÔI CẤY MÔ

DESIGN AND MANUFACTURE OF PLANT TRANSPORT UNIT IN TISSUE CULTURE BANANA PLANTING MACHINE

Phạm Thị Minh Huệ[1,*], Đặng Văn Đông[1], Trần Đăng Đức[1], Nguyễn Đức Dương[1], Nguyễn Thế Bảo[1], Nguyễn Chí Dũng[1], Nguyễn Huy Hoàng[1], Nguyễn Đức Long[2], Nguyễn Đức Thật[2]

[1]Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

[2]Viện Cơ điện Nông nghiệp và Công nghệ sau thu hoạch

**Email: phamthiminhhue@haui.edu.vn*

TÓM TẮT

Bộ phận vận chuyển cây giống trong máy trồng chuối nuôi cấy mô có nhiệm vụ vận chuyển cây chuối giống nuôi cấy mô trong bầu giá thể từ vị trí cấp bầu cây giống tới vị trí chuyển giao cho bộ phận trồng. Bộ phận này khi thiết kế cần có đủ không gian để người công nhân thực hiện thao tác cấp bầu cây giống vào họng chứa mà không phụ thuộc vào thời điểm trao cây cho bộ phận trồng. Bên cạnh đó, phải đảm bảo giữ được cây thẳng đứng trong quá trình vận chuyển và có thể điều chỉnh được thời điểm chuyển giao cây.

Từ khóa: *Bộ phận vận chuyển; Máy trồng chuối; Chuyển giao cây.*

ABSTRACT

The seedling transport unit in the tissue culture banana planting machine is responsible for transporting tissue-cultured banana seedlings in substrate pots from the seedling supply position to the handover point for the planting unit. This unit must be designed with sufficient space for workers to load the seedling pots into the feeder funnel independently of the timing of the plant handover to the planting unit. Additionally, it must ensure that the seedlings remain upright during transport and allow for adjustable timing of the seedling handover.

Keywords: *Transport unit; Banana planting machine; Seedling handover.*

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, canh tác chuối ở trên thế giới đã ứng dụng các máy móc thiết bị và công nghệ hiện đại nhằm tăng năng suất sản lượng, chất lượng quả chuối thành phẩm và giảm chi phí lao động. Đồng thời, chuối trồng với quy mô tập trung lớn canh tác đồng bộ vừa đáp ứng khả năng cung cấp cho thị trường tiêu dùng thì việc kiểm soát chặt trẽ các khâu trong quy trình canh tác đã giải quyết các vấn đề về giống, kỹ thuật canh tác cải tạo bổ sung kịp thời các chất vi lượng cho đất, kiểm soát phòng trừ sâu bệnh và bảo vệ môi trường [2], [7]. Ở Việt Nam, cơ giới hóa canh tác các loại cây trồng đã có nghiên cứu về giống và áp dụng thiết bị máy móc cơ giới chủ yếu trong khâu làm đất, chăm sóc, [8]… Tuy nhiên, đối với khâu trồng cho cây chuối chưa được quan tâm nghiên cứu và thực hiện 100% bằng thủ công. Vấn đề nghiên cứu đặt ra cần được tự động hoặc bán tự động các khâu từ chứa cây giống - vận chuyển cây giống - trồng với các điều khiển cơ - điện tử hay lập trình nhằm tạo ra sự phù hợp tính năng của máy đáp ứng yêu cầu kỹ thuật nông học cho từng loại cây trồng và tăng khả năng ứng dụng vào thực tiễn sản xuất.

2. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

2.1. Nguyên lý, thiết kế và chế tạo

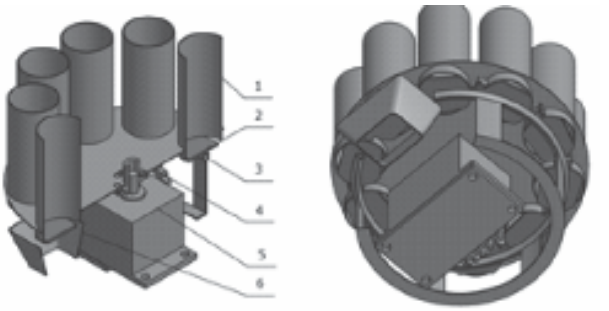
2.1.1. Lựa chọn nguyên lý

Nguyên lý vận chuyển có thể ứng dụng trên máy trồng bao gồm: Vận chuyển cây bằng băng tải, xích tải và đĩa quay.

Yêu cầu của bộ phận vận chuyển cây giống: Có đủ không gian để người công nhân thực hiện thao tác cấp bầu cây giống vào họng chứa mà không phụ thuộc vào thời điểm trao cây cho bộ phận trồng, giữ được cây thẳng đứng trong quá trình vận chuyển và có thể điều chỉnh được thời điểm chuyển giao cây; đã lựa chọn phương án vận chuyển bầu cây giống bằng đĩa quay (dạng băng đạn) với ưu điểm kết cấu gọn, khoảng cách vận chuyển tùy thuộc vào yêu cầu thông qua đường kính đĩa quay.

2.1.2. Thiết kế và chế tạo bộ phận vận chuyển cây giống

Bộ phận vận chuyển cây có nhiệm vụ chuyển bầu cây giống từ khay chứa (cấp thủ công) đến bộ phận trao cây và rơi vào mũi trồng. Truyền động của đĩa vận chuyển cây được thực hiện qua nhông xích truyền động và hộp số bánh răng trục vít điều chỉnh tỷ số truyền. Trong quá trình làm việc, bộ phận vận chuyển cây chịu lực xoắn. Do vậy, vật liệu chế tạo cụm vận chuyển cây là thép tấm CT3 và thép ống CT3 [1], [3]. Bộ phận vận chuyển cây giống có cấu tạo như hình 1.



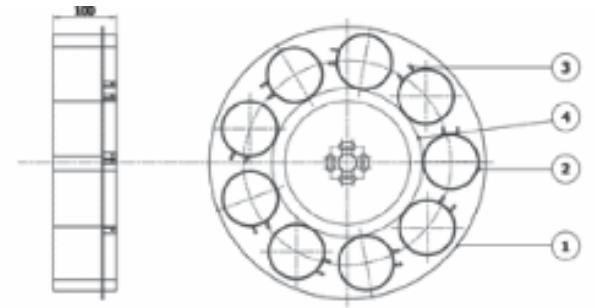
Hình 1. Cấu tạo của bộ phận vận chuyển cây
1. Đĩa chứa cây; 2. Tấm đáy ống;
3. Khung đỡ đáy; 4. Nhông xích truyền động;
5. Trục vít; 6. Phễu hứng cây

Bộ phận vận chuyển cây bao gồm đĩa chứa cây (1). Dưới đáy các ống chứa được lắp các tấm đáy ống (2) liên kết với thân ống dạng bản lề. Khung đỡ đáy (3) duy trì tấm đáy chỉ mở khi tại vị trí giao và thả bầu cây. Nhông xích truyền động (4) cung cấp chuyển động cho

trục vít (5) làm đĩa quay theo tỷ số truyền đã tính toán. Phễu hứng cây (6) dẫn hướng cho bầu cây vào mũi trồng không bị rơi ra ngoài. Trong quá trình làm việc, mỗi chi tiết có các nhiệm vụ khác nhau nên phải lựa chọn vật liệu chế tạo phù hợp với cấu tạo, công năng của chi tiết.

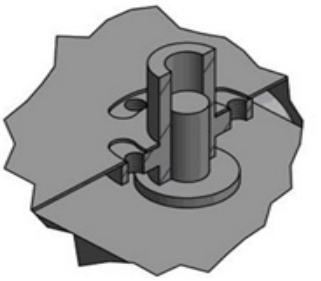
2.1.3. Quy trình công nghệ chế tạo [4], [5]

Gồm các nguyên công như chuẩn bị thép tấm CT3 dày 1,5mm; Tính toán khai triển và vẽ bản vẽ khai triển phôi trên máy tính bằng phần mềm Autocad chi tiết đĩa quay, ống chứa cây, mặt bích, phễu chứa,...; Lập chương trình trên máy cắt plasma0 CNC để cắt tấm phôi; Tiến hành cắt phôi trên máy cắt plasma điều khiển CNC theo chương trình đã lập. Sử dụng máy mài cầm tay Makita 100 để mài cùn các cạnh sắc như hình 2.



1. Đĩa quay; 2. Ống cấp; 3. Tai bắt nắp ống; 4. Gân tăng cứng
Hình 2. Bản vẽ cụm vận chuyển cây

Nhóm đã lựa chọn bộ truyền động bánh răng trục vít với tỷ số truyền i = 10. Với hộp số bánh răng - trục vít truyền động theo trục ngang được chuyển hướng ra thành trục đứng, phù hợp với kết cấu của máy. Để đảm bảo sự đồng bộ giữa bộ phận đĩa vận chuyển cây và bộ phận trồng cây, cần phải điều chỉnh được vị trí đặt của các ống vận chuyển so với bộ phận trồng. Điều này được thực hiện nhờ rãnh ô van trên đĩa được bắt với mặt bích lắp vào đầu trục ra hộp số như hình 3.



Hình 3. Điều chỉnh thời điểm trao của bộ phận cấp cây

2.2. Tính toán một số thông số kỹ thuật của bộ phận vận chuyển cây giống

Làm cơ sở tính toán, lựa chọn đường kính, chiều cao ống chứa bầu cây, Nhóm đã thực hiện thí nghiệm cụ thể:

2.2.1. Thí nghiệm

Nội dung thí nghiệm: Thí nghiệm gồm 6 công thức, mỗi công thức nhắc lại 3 lần được nêu trong bảng 1.

Bảng1. Kích thước túi bầu và cây giống

Công thức	Kích thước túi bầu và kích thước cây giống
1	8 x 10 cm, 20 cm ≤ chiều cao cây < 25 cm, có 5-7 lá
2	8 x 8 cm, 20 cm ≤ chiều cao cây < 25 cm, có 5-7 lá
3	10 x 10 cm, 20 cm ≤ chiều cao cây < 25 cm, có 5-7 lá
4	8 x 10 cm, 25 cm ≤ chiều cao cây ≤ 30 cm, có 5-7 lá
5	8 x 8 cm, 25 cm ≤ chiều cao cây ≤ 30 cm, có 5-7 lá
6	10 x 10 cm, 25 cm ≤ chiều cao cây ≤ 30 cm, có 5-7 lá

☞

Cây chuối đóng trong túi bầu Polietylen có đục lỗ ở đáy và xung quanh, giá thể đóng bầu gồm đất chứa giá thể gồm có mụn dừa, cát, trấu vỏ (tỉ lệ 4:1:1) có bổ sung thêm phân hữu cơ, lân và vôi. Thí nghiệm được chăm sóc theo quy trình của Viện Nghiên cứu Rau quả.

2.2.2. Chỉ tiêu và phương pháp theo dõi

- Chỉ tiêu theo dõi: Tỉ lệ cây sống (theo dõi 100 cây/lần nhắc). Chiều cao thân giả đo từ mặt đất đến giao điểm của 2 lá cuối (1 tháng đo 1 lần, theo dõi 15 cây/lần nhắc). Chu vi thân giả: Đo cách mặt đất 40 cm (1 tháng đo 1 lần, theo dõi 15 cây/lần nhắc). Tốc độ ra lá mới (1 tháng đo 1 lần, theo dõi 15 cây/lần nhắc).

$$\text{Tỷ lệ cây sống (\%)} = \frac{\Sigma \text{ cây sống}}{\Sigma \text{ cây theo dõi}} \times 100$$

- Phương pháp theo dõi: Mỗi công thức theo dõi 15 cây cố định/1lần nhắc lại. Kết quả thí nghiệm được tính bằng trung bình của 3 lần nhắc. Phương pháp phân tích số liệu được xử lý trên phần mềm Excel và chương trình IRRISTAR 5.0.

*Kết quả: Cũng như các loại cây trồng khác, kích thước bầu giâm ảnh hưởng rất lớn đến sinh trưởng của cây giống. Cây chuối nuôi cấy mô đạt tiêu chuẩn trồng khi chiều cao từ 20-30 cm và có 5-7 lá. Tuy nhiên, khi tiến hành trồng cơ giới hóa, tỉ lệ sống của cây sau trồng ở các công thức có sự khác nhau. Kết quả được nêu trong bảng 2.

Bảng 2. Ảnh hưởng của kích thước túi bầu và kích thước cây giống chuối đến tỉ lệ sống của cây sau trồng

Công thức TN	Kích thước túi bầu và kích thước cây giống	Tỉ lệ sống của cây sau trồng		
		10 ngày	20 ngày	30 ngày
CT1	8 x 10 cm, 20 cm ≤ chiều cao cây < 25 cm, có 5-7 lá	93,1	91,9	90,5
CT2	8 x 8 cm, 20 cm ≤ chiều cao cây < 25 cm, có 5-7 lá	87,6	84,1	83,8
CT3	10 x 10 cm, 20 cm ≤ chiều cao cây < 25 cm, có 5-7 lá	96,7	94,0	94,0
CT4	8 x 10 cm, 25 cm ≤ chiều cao cây ≤ 30 cm, có 5-7 lá	90,7	87,0	87,0
CT5	8 x 8 cm, 25 cm ≤ chiều cao cây ≤ 30 cm, có 5-7 lá	86,2	83,3	83,1
CT6	10 x 10 cm, 25 cm ≤ chiều cao cây ≤ 30 cm, có 5-7 lá	92,7	90,6	90,0
	LSD5%	2,02	4,67	4,55
	CV (%)	8,6	9,5	8,8

Kết quả cho thấy, công thức 3 (cây giống trồng trong túi bầu kích thước 10 x 10, chiều cao cây 20 - 25 cm) tỉ lệ sống của cây đạt cao nhất. Sau trồng 10 ngày, tỉ lệ sống đạt 96,7%, sau 20 ngày là 94,0%. Tiếp đến là công thức 1 và công thức 6 (sau trồng 10 ngày, tỉ lệ sống lần lượt là 93,1% và 92,7%, sau trồng 20 ngày tỉ lệ sống là 91,9% và 90,6%). Thấp nhất là công thức 5 và công thức 2, tỉ lệ sống sau trồng 10 ngày lần lượt là 86,2%, 87,6%, sau 20 ngày là 83,3% và 84,1%. Khi trồng bằng máy, bầu cây kích thước 8 x 8 cm dễ bị vỡ bầu, ảnh hưởng đến sinh trưởng cây con nên tỉ lệ sống thấp hơn. Sau 30 ngày trồng, tỉ lệ sống thay đổi không đáng kể so với sau trồng 20 ngày. Nguyên nhân do, sau trồng 20 ngày cây chuối nuôi cấy mô ổn định bộ rễ, bắt đầu sinh trưởng, ra lá mới. Như vậy, trồng chuối bằng máy không ảnh hưởng đến thời gian sinh trưởng của cây. Trồng chuối cơ giới hóa, sử dụng cây giống chuối nuôi cấy mô trồng trong túi bầu 10 x 10 cm, chiều cao cây 20 ÷ 25 cm, có 5 ÷ 7 lá thích hợp nhất. Sau trồng 30 ngày tỉ lệ sống đạt 94,0%, chiều cao cây 65,2 cm, đường kính thân 6 cm, 13 lá/cây. Như vậy, đường kính ống chứa bầu cây phải lớn hơn 100 mm. Theo tiêu chuẩn ống thép tròn và chiều cao ống phải lớn hơn chiều cao của bầu (100 mm), đủ kích thước để bảo vệ thân, lá cây giống. Do đó, nhóm nghiên cứu lựa chọn loại ống đường kính ngoài 110 mm, độ dày 3 mm và chiều cao của ống chứa bầu cây giống là 220 mm.

3. KẾT LUẬN

Trên cơ sở phân tích nguyên lý, nhóm đã lựa chọn được bộ phận vận chuyển cây giống dạng đĩa có lắp các ống chứa cây. Với kết cấu này, cơ cấu trao cây giữa bộ phận vận chuyển tới bộ phận trồng khá đơn giản và dễ chế tạo. Đã thiết kế chi tiết, chế tạo bộ phận vận chuyển cây với thông số: Đường kính ngoài ống chứa là 110 mm, dày 3 mm, chiều cao của ống chứa là 220 mm và điều chỉnh được thời điểm trao cây đồng bộ trong chu trình chung của máy.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **20/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. GS,TS. Trần Văn Địch (2006), "*Công nghệ chế tạo máy*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[2]. Eden A. Perez and Cerruti R2 Hooks, "*BIO-8 Preparing Tissue-Cultured Banana Plantlets*". Biotechnology, Mar. 2008.
[3]. Kikulwe, E. (2016), "*Banana tissue culture: community nurseries for African farmers*". In Case studies of roots, tubers and bananas seed systems.
[4]. GS,TS. Nguyễn Đắc Lộc (2006), "*Sổ tay công nghệ chế tạo máy*", tập 1,2,3. NXB Khoa học và Kỹ thuật.
[5]. GS,TS. Nguyễn Đắc Lộc (2006), "*Hướng dẫn thiết kế Đề án Công nghệ chế tạo máy*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[6]. Hán Thị Hồng Ngân (2016), "*Kết quả nghiên cứu xác định mật độ trồng chuối thích hợp cho giống chuối tiêu hồng tại Phú Thọ*". Tạp chí Khoa học Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam, Số 4 (65)/2016.
[7]. TS. Trần Danh Sửu, TS. Bùi Thị Thu Huyền (2017), "*Kỹ thuật trồng và chăm sóc cây chuối*".
[8]. "*Sổ tay hướng dẫn kỹ thuật canh tác cây chuối theo Vietgap*". Cục Trồng trọt - Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn.
[9]. Market-Intelligence-Report-Bananas-revised-NAB-29032024.

THIẾT BỊ ĐO ĐIỆN TIM CẦM TAY HỖ TRỢ CHẨN ĐOÁN BỆNH TỪ XA

PORTABLE ECG DEVICE SUPPORTS PREDICTING DISEASE FROM AFAR

Đặng Quốc Vương, Lê Đức Huy, Ngô Lê Hoàng Long, Bùi Quốc Thắng, Lương Thanh Nhật
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
Email: thanhnhatluong@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm phát triển một thiết bị đo điện tim cầm tay nhỏ gọn cùng với một ứng dụng di động, cho phép bệnh nhân và bác sĩ kết nối và trao đổi thông tin một cách thuận tiện và hiệu quả hơn. Nghiên cứu này lấy mẫu với tần số 250Hz, đã có 40 người khác nhau tham gia tình nguyện với thời lượng đo 15 phút, tất cả dữ liệu được lưu trên cơ sở dữ liệu đám mây. Sau mỗi lần đo xong, ứng dụng di động tốn khoảng 5 giây để cập nhật tệp dữ liệu lên máy chủ.

Từ khóa: *ECG; Điện tâm đồ; Thiết bị cầm tay.*

ABSTRACT

This research aims to develop a compact handheld ECG device along with a mobile application, allowing patients and doctors to connect and exchange information more conveniently and efficiently. This study sampled at a frequency of 250Hz, involving 40 different volunteers with a measurement duration of 15 minutes. All data was stored in a cloud-based database. After each measurement session, the mobile application took approximately 5 seconds to update the data file to the server.

Keywords: *ECG; Electrocardiogram; Portable device.*

1. GIỚI THIỆU

Bệnh tim mạch và các biến chứng liên quan là một trong những nguyên nhân gây tử vong hàng đầu trên toàn thế giới. Theo ước tính, có khoảng 17,9 triệu người tử vong do bệnh tim mạch tương ứng với 32% tổng số ca tử vong trên toàn cầu vào năm 2019. Trong số những ca tử vong này có đến 85% nguyên nhân là do đau tim và đột quỵ. Có đến hơn 75% tổng số ca tử vong do bệnh tim mạch xảy ra tại các nước có thu nhập thấp và trung bình [1]. Tại Việt Nam, xu hướng tử vong do bệnh tim mạch đang ngày càng tăng, trong đó tử vong do bệnh mạch máu não chiếm tỷ lệ lớn nhất, với tỷ suất tử vong tăng từ 127,3/100.000 dân (năm 2000) lên 164,9/100.000 dân (năm 2022) [2]. Mặc dù có tỉ lệ tử vong cao, tuy nhiên các triệu chứng của bệnh tim mạch có liên quan trực tiếp đến hành vi, lối sống và đặc biệt có thể theo dõi sớm để ngăn ngừa kịp thời. Do đó, nhu cầu và sự quan tâm đối với các thiết bị cầm tay có thể theo dõi hành động và sức khỏe tim mạch ngày càng tăng [3] bởi tính tiện dụng và linh hoạt của

nó. Một trong những phương pháp giúp theo dõi được sức khỏe của tim mạch hiện nay là sử dụng điện tâm đồ (Electrocardiogram) hay ECG (EKG) là một phương pháp ghi lại hoạt động của tim do Wiillem Einthoven phát minh vào năm 1902 [4]. Điện tâm đồ là một phần không thể thiếu trong các đánh giá ban đầu đối với các bệnh nhân có nghi ngờ hoặc gặp các vấn đề liên quan đến tim mạch. Hiện nay, trên thị trường đã có một số sản phẩm thương mại hỗ trợ đo điện tim cầm tay.

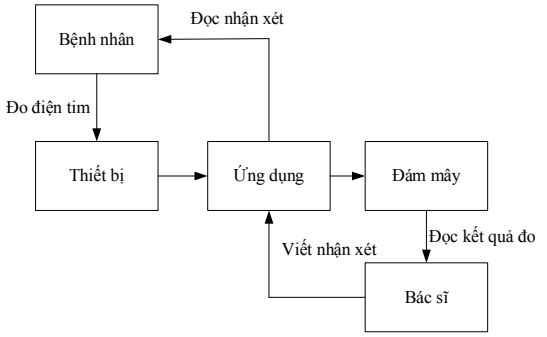
Bảng 1. Một số thiết bị đo điện tim cầm tay và đặc điểm

Thiết bị đo điện tim	Đặc điểm	Giá thành
Beurer ME90 [5]	- Thời gian đo: 30s - Xuất kết quả để gửi cho chuyên gia đánh giá thông qua email hoặc mang đến cơ sở y tế	- 170$ (4.800.000 VND)
Omron Complete Wireless Upper Arm Blood Pressure Monitor + EKG [6]	- Tích hợp nhiều tính năng trên thiết bị - Xuất kết quả để gửi cho chuyên gia thông qua email hoặc mang đến cơ sở y tế.	- 150$ (3.752.000 VND)
FL10 Portable ECG Monitor [7]	- Thời gian đo: 30s - Xuất ra kết quả để gửi cho chuyên gia thông qua email hoặc mang trực tiếp đến cơ sở y tế	- 70$ (1.765.000 VND)

Từ các thiết bị đã khảo sát ở Bảng 1, có thể thấy quy trình đo bằng các thiết bị cầm tay trên còn một số nhược điểm như thời gian lấy mẫu còn quá ngắn: 30s so với tiêu chuẩn [8], cùng với đó là khi thực hiện đo nhanh chưa phân ra các hình thái vận động khác nhau, bao gồm thực hiện đo khi nằm nghỉ từ 5-10 phút, đo khi vận động thể thao cường độ cao từ 15-30 phút và đo lưu động với chu kỳ ít nhất là 24 giờ, từ đó dễ dẫn đến sai lệch kết quả trong quá trình đánh giá. Ngoài ra, một nhược điểm khác của các thiết bị cầm tay sẵn có chính là hầu hết người sử dụng đều không có khả năng đọc kết quả trực tiếp từ thiết bị mà phải mang kết quả đến gặp bác sĩ hoặc gửi kết quả thông qua email. Điều này đặc biệt khó khăn đối với những người lớn tuổi, sức khỏe không đảm bảo trong việc di chuyển và đặc biệt khi chờ đợi đọc kết quả tại bệnh viện cũng sẽ mất rất nhiều thời gian. Ngoài ra, chức năng gửi email cũng không khả thi khi kiến thức về công nghệ của người cao tuổi vẫn còn nhiều hạn chế.

Từ những hạn chế của các thiết bị đã có trên thị trường, nghiên cứu này sẽ tập trung vào việc tăng tính tiện lợi cho cả bệnh nhân và bác sĩ trong quy trình tầm soát từ xa các bệnh tim mạch. Nhóm nghiên cứu sẽ thiết kế một thiết bị đo điện tim thông minh sử dụng công nghệ IoT với giá thành thấp, dữ liệu sẽ được lưu trên điện toán đám mây và có thể truy cập từ xa. Sơ đồ quy trình hoạt động của hệ thống đo điện tim tích hợp IoT được thể hiện ở Hình 1 bên dưới. Bệnh nhân sẽ truy cập vào phần mềm để thực hiện đo điện tim, kết quả đo sẽ được lưu vào đám mây. Bác sĩ sẽ có quyền truy cập vào dữ ☞

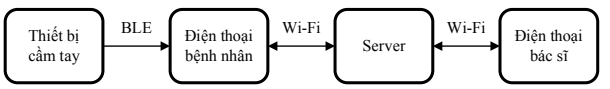
liệu của bệnh nhân mà mình quản lí và nhận xét trực tiếp thông qua ứng dụng của thiết bị cho bệnh nhân. Ngoài ra, nghiên cứu cũng sẽ thực hiện một số phương pháp lọc tín hiệu trên dữ liệu điện tim để tăng tính tin cậy của phép đo.



Hình 1. Sơ đồ quy trình hoạt động của hệ thống đo điện tim tích hợp IoT

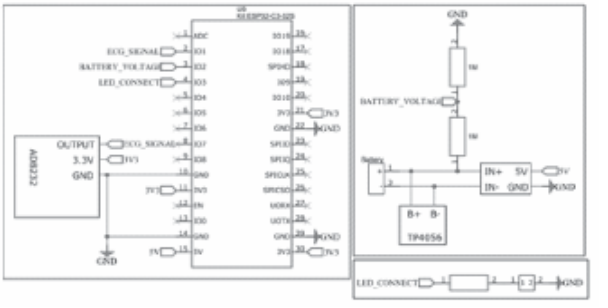
2. PHƯƠNG PHÁP

Sơ đồ ở Hình 2 thể hiện các luồng truyền nhận dữ liệu của hệ thống. Hệ thống truyền nhận dữ liệu sẽ bao gồm tín hiệu từ thiết bị đo điện tim cầm tay được gửi về ứng dụng điện thoại của bệnh nhân thông qua giao thức Bluetooth Low Energy (BLE). Sau khi đo xong, người bệnh có thể gửi tệp dữ liệu điện tâm đồ lên máy chủ đám mây bằng giao tiếp Internet. Lúc này, phần mềm bên phía bác sĩ sẽ nhận được thông báo và bác sĩ có thể đưa ra nhận xét về tình trạng bệnh lý của bệnh nhân dựa trên những gì đã đo và phía giao diện của người bệnh sẽ hiện lên chẩn đoán của bác sĩ.



Hình 2. Sơ đồ truyền nhận dữ liệu

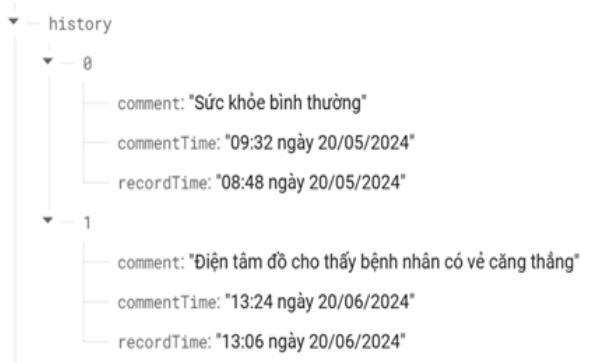
Để có thể truyền nhận tín hiệu bằng Bluetooth, thiết bị đo điện tim cầm tay, một số phương án được đề xuất như: CC1312R7 [9], Raspberry Pi Pico W [10] và ESP32 [11]. Trong đó ESP32 là một phương án phù hợp cả về giá thành và tính năng, sẽ cần phải dùng ESP32. Mạch vi điều khiển ESP32 sản xuất bởi công ty Espressif có khả năng kết nối Wi-Fi và Bluetooth, cho phép gửi dữ liệu đến các thiết bị thông minh khác như điện thoại thông minh một cách tiện lợi và ít tốn kém thời gian. Ngoài ra, ESP32 có kích thước nhỏ và tiêu thụ điện năng tương đối thấp, lý tưởng cho một thiết bị cầm tay nhỏ gọn và tuổi thọ pin lâu. Sơ đồ mạch điện trong Hình 3 cho thấy vi điều khiển ESP32 kết nối với module đo điện tim AD8232. Bên cạnh đó, thiết bị còn được tích hợp mạch sạc pin lithium cho phép người dùng sạc lại thiết bị. Điện áp của pin lithium có giá trị từ 3.7V đến 4.2V, nhưng bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang kỹ thuật số của ESP32 chỉ nhận điện thế từ 3.3V trở xuống, thế nên cần kết hợp với hai điện trở mắc nối tiếp để tạo thành mạch chia áp làm giảm tín hiệu pin về khoảng từ 1.85V đến 2.1V tương đương 0% đến 100% dung lượng pin. Ngoài ra, mạch còn có đèn báo hiệu cho biết thiết bị đã kết nối với ứng dụng di động.



Hình 3. Sơ đồ điện của thiết bị đo điện tim cầm tay

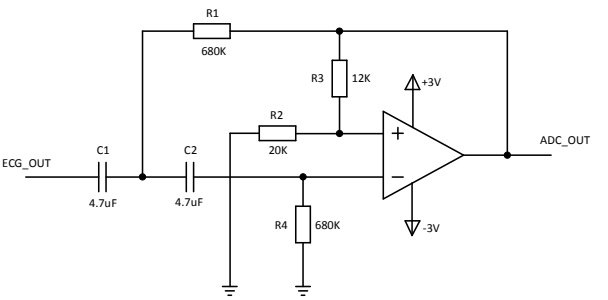
Máy chủ dùng cho nghiên cứu này chính là Firebase do công ty Google cung cấp. Dịch vụ này bao gồm cơ sở dữ liệu thời gian thực, lưu trữ tệp đám mây và xác thực người dùng giúp xây dựng và quản lý ứng dụng một cách hiệu quả. Một trong những điểm mạnh của Firebase là khả năng tích hợp dễ dàng với các dịch vụ khác của Google và bên thứ ba, giúp tối ưu hóa trải nghiệm người dùng và tăng

cường tính năng của ứng dụng. Không những vậy, Firebase cho phép nhà phát triển sử dụng miễn phí dịch vụ ở quy mô nhỏ. Cơ sở dữ liệu sẽ được thiết kế với cấu trúc như trong Hình 4. Mỗi lần bệnh nhân đo xong, tệp dữ liệu sẽ được gửi đến kho lưu trữ đám mây của Firebase và thông tin sẽ được cập nhật ở cơ sở dữ liệu thời gian thực bao gồm thời gian đo, thời gian bình luận và nội dung bình luận về tình trạng bệnh lý của người bệnh dựa trên tệp dữ liệu điện tâm đồ được bác sĩ xem và đánh giá.



Hình 4. Cấu trúc cơ sở dữ liệu thời gian thực

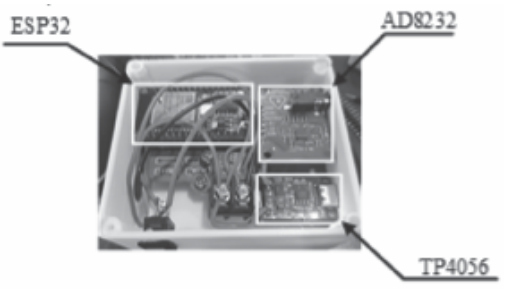
Trong quá trình đo điện tim, đôi khi bệnh nhân sẽ có những chuyển động nhỏ đến từ việc hít thở hoặc cử động cơ thể, điều này sẽ gây ảnh hưởng đến đường cơ sở của biểu đồ điện tim. Do đó cần tích hợp bộ lọc đường cơ sở dùng để loại bỏ tín hiệu nhiễu dạng gai có tần số từ 0.5Hz trở xuống [12] như trong Hình 5. Hai đoạn mạch RC bao gồm R1-C1 và R4-C2 có công dụng lọc thông cao, giúp loại bỏ tín hiệu tần số 0.5Hz. Giá trị của điện trở R1 và R4 phải lớn hơn 250kΩ để tạo cách ly giữa bệnh nhân với mạch điện. R2 là điện trở kéo xuống để tránh hiện tượng nổi ở ngõ vào thuận của op-amp, đồng thời giúp điều khiển mức khuếch đại tín hiệu điện của mạch khi kết hợp với R3. Tần số lấy mẫu được chọn là 250Hz [13] vì đây là tần số tối thiểu để dữ liệu có thể được phân tích trong miền tần số.



Hình 5. Bộ lọc đường cơ sở

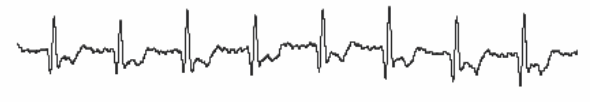
3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Sản phẩm trong Hình 6 bao gồm vỏ hộp nhựa và các mạch module ESP32, AD8232, mạch sạc pin TP4056, mạch ổn áp 5V được tích hợp vào mạch in PCB. Bên cạnh đó, pin lithium được đặt ở một ngăn riêng biệt nhằm hạn chế sự nhiễu đến từ nguồn điện. Vỏ hộp được in 3D có các lỗ cho phép người dùng cắm dây điện tim và dây sạc pin. Nắp hộp được cố định với thân bằng 4 vít nhọn.



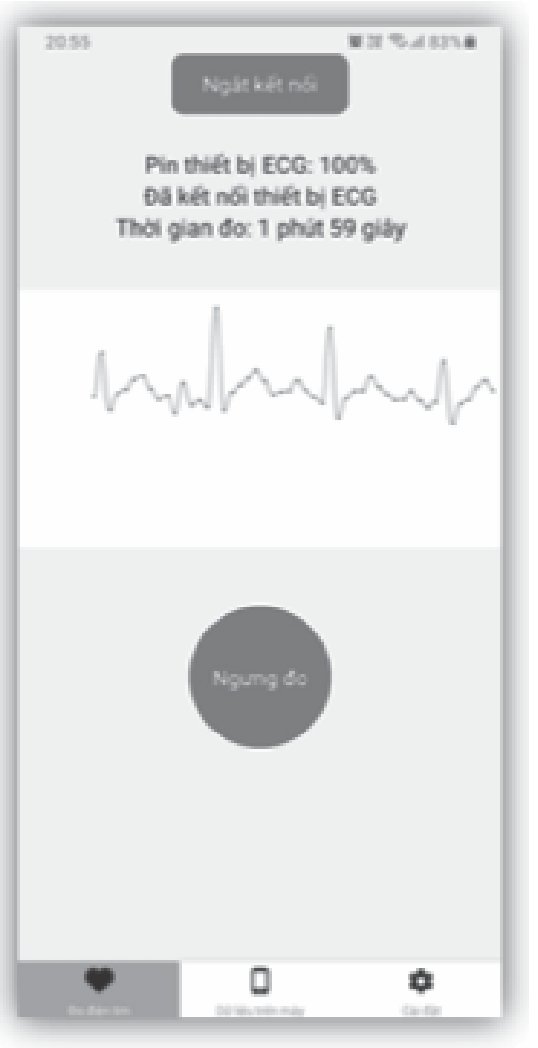
Hình 6. Thiết bị đo điện tim cầm tay

Sau khi thực nghiệm đo bằng mạch AD8232 kết hợp với mạch lọc đường cơ sở, dữ liệu được lấy bằng cách cho vi điều khiển ESP32 gửi tín hiệu ADC đo được về máy tính thông qua giao tiếp Serial.



Hình 7. Điện tâm đồ đo được của thiết bị

Giao diện người dùng của ứng dụng di động được thiết kế bằng React Native cho phép phần mềm có thể chạy ở cả hệ điều hành Android và iOS. Trước khi có thể dùng chức năng đo điện tim như trong Hình 8, người dùng sẽ cần phải kết nối ứng dụng với thiết bị đo điện tim cầm tay chỉ với một nút bấm trên màn hình. Sau khi đo xong với khoảng thời gian đã thiết lập trước trong phần cài đặt, phần mềm sẽ tự động ngưng đo và lưu dữ liệu thu được thành một tệp csv. Bệnh nhân có thể đăng nhập và gửi tệp này lên máy chủ đám mây để bác sĩ chẩn đoán bệnh và đưa ra nhận xét.



Hình 8. Ứng dụng di động

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, một thiết bị đo điện tim cầm tay tiêu thụ điện năng thấp đã được thiết kế với chi phí thấp hơn nhiều so với các thiết bị hiện có trên thị trường. Thiết bị này không chỉ tiết kiệm chi phí mà còn đảm bảo độ chính xác cao trong việc đo lường các tín hiệu điện tim với tần số lấy mẫu 250Hz. Để cải thiện dữ liệu đo, mạch lọc đường cơ sở đã được áp dụng nhằm loại bỏ tần số nhiễu 0.5Hz do chuyển động cơ thể gây ra. Dữ liệu được hiển thị trực tiếp trên màn hình của ứng dụng di động, với thời lượng đo có thể điều chỉnh tùy vào tình huống đo khác với các sản phẩm trên thị trường chỉ cho phép một số thời gian đo cố định. Hơn nữa, dữ liệu này có thể được lưu trữ vào cơ sở dữ liệu đám mây, tạo điều kiện thuận lợi cho các bác sĩ trong việc chẩn đoán và theo dõi tình trạng sức khỏe của bệnh nhân từ xa. Nghiên cứu này đã thu thập 40 mẫu dữ liệu, mỗi mẫu có dung lượng 15 phút, tất cả được lưu trên cơ sở dữ liệu đám mây. Sau mỗi lần đo xong, ứng dụng di động tốn khoảng 5 giây để cập nhật tệp dữ liệu lên máy chủ.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài NCKH cấp Trường trong khuôn khổ đề tài mã số T-CK-2023-01. Nhóm tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ phương tiện và cơ sở vật chất cho đề tài này.❖

Ngày nhận bài: **02/4/2025**
Ngày phản biện: **15/4/2025**

Tài liệu tham khảo

[1]. W. H. Organization, "*Cardiovascular diseases (CVDs)*". World Health Organization (WHO) Fact sheets, 2021.

[2]. B. Y. Tế, "*Cổng thông tin điện tử Bộ Y Tế (MOH),*" Bộ Y Tế, 16 12 2022. [Trực tuyến]. Available: https://moh.gov.vn/tin-tong-hop/-/asset_publisher/k206Q9qkZOqn/content/xu-huong-tu-vong-do-benh-tim-mach-ang-ngay-cang-tang-tai-viet-nam. [Đã truy cập 20 11 2023].

[3]. Atsushi Mizuno, Sujatha Changolkar and Mitech S. Patel, "*Wearable Devices to Monitor and Reduce the Risk of Cardiovascular Disease: Eviddennce and Opportunities*". Annual Reviews, pp. 459-471, 2021.

[4]. Yasar Sattar and Lovely Chhabra, "*Eclectrocardiogram*". Trong StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL), StatPearls, 2023.

[5]. Beurer, "*Beurer ME 90 Mobile ECG Device Instruction Manual*". 4 December 2022. [Trực tuyến]. Available: https://manuals.plus/beurer/me-90-mobile-ecg-device-manual.

[6]. Omcron, "*Omcron Healthcare - Complete™ Wireless Upper Arm Blood Pressure Monitor + EKG*" [Trực tuyến]. Available: https://omronhealthcare.com/products/complete-wireless-upper-arm-blood-pressure-monitor-ekg-bp7900/downloads.

[7]. Facelake, "*Facelake-FL10 Portable ECG Monitor with Bluetooth, APP and PC software*" [Trực tuyến]. Available: https://facelake.com/products/fl10-portable-ecg-monitor.

[8]. "*Better Health Channel*" [Trực tuyến]. Available: https://www.betterhealth.vic.gov.au/health/conditionsandtreatments/ecg-test. [Đã truy cập 25 11 2023].

[9]. T. Intruments, "*Texas Intruments*", November 2021 [Trực tuyến].

[10]. R. Pi, "*Raspberry Pi - Pico-series Microcontrollers*", 30 December 2022. [Trực tuyến]. Available: https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf#page=27&zoom=100,153,181.

[11]. "*espressif*" [Trực tuyến]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.

[12]. W. J. Winncy Y DU, "*Design of an ECG Sensor Circuitry for Cardiovascular Disease Diagnosis*". International Journal of Biosensors & Bioelectronics, tập 2, số 4, pp. 120-125, 2017.

[13]. O. Kwon, "*Electrocardiogram Sampling Frequency Range Acceptable for Heart Rate Variability Analysis*". Healthcare Informatics Research, tập 24, số 3, pp. 198-206, 2018.

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CHU TRÌNH HOẠT ĐỘNG ĐẾN TIÊU HAO NĂNG LƯỢNG TRÊN Ô TÔ

INFLUENCE OF DUTY CYCLES ON VEHICLE ENERGY EFFICIENCY

TS. **Lê Thanh Tuấn**[1], PGS,TS. **Vũ Ngọc Tuấn**[2], ThS. **Đỗ Nhật Trường**[3,*]
[1]Viện Kỹ thuật, Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh
[2]Học viện Kỹ thuật quân sự
[3]Khoa CNKT Ô tô, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Bình Dương
**Email: donhattruong105@gmail.com*

TÓM TẮT

Bài báo tập trung phân tích ảnh hưởng của chu trình hoạt động (bao gồm biên dạng vận tốc và điều kiện khai thác thực tế) đến tiêu hao năng lượng trên ô tô, một khía cạnh chưa có nhiều nghiên cứu trong bối cảnh chênh lệch lớn giữa kết quả đánh giá tiêu chuẩn và thực tế [8]. Trên cơ sở xây dựng mô hình động lực học chuyển động thẳng và thực hiện đánh giá tiêu hao năng lượng theo chu trình FTP75 [5] và 03 chu trình thực tế. Kết quả cho thấy mức tiêu hao năng lượng phụ thuộc vào tần suất tăng – giảm tốc và dừng đỗ, hay mở rộng ra là các yếu tố động lực học chuyển động. Từ đó, nội dung nghiên cứu là cơ sở ứng dụng để đánh giá hiệu quả sử dụng ô tô và phục vụ phát triển các thuật toán tối ưu hóa năng lượng phương tiện thông qua việc kiểm soát động lực học chuyển động ô tô.

Từ khoá: *Tiêu hao năng lượng; GPS; Chu trình FPT75; Mô hình động lực học chuyển động thẳng; Chu trình hoạt động.*

ABSTRACT

The paper focuses on analyzing the impact of driving cycles including velocity profiles and real-world operating conditions on vehicle energy consumption, an aspect that has been underexplored given the significant discrepancies between standardized test results and actual usage [8]. A longitudinal vehicle dynamics model is developed as the analytical foundation, and energy consumption assessments are conducted under the standardized FTP75 cycle [5] as well as three real-world driving cycles. The results reveal that energy consumption is highly influenced by the frequency of acceleration, deceleration, and idling events essentially governed by the vehicle's dynamic motion characteristics. Consequently, the study provides a practical foundation for evaluating vehicle operational efficiency and supports the development of vehicle energy optimization algorithms through dynamic motion control.

Keywords: *Energy consumption; GPS; Energy efficiency; FTP75; Vehicle dynamics longitudinal model; Duty cycle.*

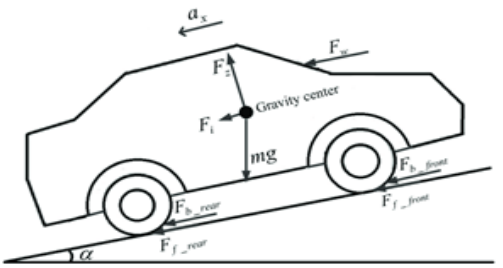
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, nâng cao hiệu quả năng lượng trên ô tô trở thành mục tiêu then chốt [4]. Tiêu hao năng lượng của phương tiện chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như: hệ thống truyền lực, đặc điểm hạ tầng giao thông hay cả phương pháp điều khiển. Điều đó, được chứng minh bởi sự phân tích từ nhiều khía cạnh khác nhau về hiệu quả năng lượng, như: tác động đến hệ thống truyền lực thông qua cải tiến hộp số tự động [2], hay phân tích hành vi của người điều khiển [3] với đặc điểm cơ sở hạ tầng và kể cả đề xuất phương pháp điều khiển thông minh trên xe điện tự hành [4]. Từ đó, cho thấy các nghiên cứu đã đạt được những kết quả quan trọng. Tuy nhiên, vẫn chưa có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của chu trình hoạt động đến hiệu suất năng lượng. Xuất phát từ nhận định đó, bài báo này tập trung khảo sát ảnh hưởng của chu trình hoạt động đến tiêu hao năng lượng trên ô tô.

2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình động lực học chuyển động thẳng

Để làm cơ sở khảo sát mức tiêu hao năng lượng, bài báo đã xây dựng theo mô hình động lực học chuyển động thẳng nhằm xác định mối quan hệ giữa vận tốc và tiêu hao năng lượng, làm nền tảng để đánh giá hiệu suất vận hành xe [7].



Hình 1. Sơ đồ các lực tác dụng

Một số giả thiết: Mặt đường với độ dốc không đáng kể, bỏ qua ảnh hưởng của dao động ngang, độ trượt ngang, hay mô men quay quanh trục đứng. Đồng thời, hệ thống truyền động có phản ứng tức thời, không xét đến độ trễ điều khiển hay quán tính cơ cấu truyền lực [7].

Tổng các lực xét theo sơ đồ lực, hình 2:

$$F_{\Sigma} = F_f + F_{\mathrm{W}} \pm F_{qt} \pm F_i \quad (1)$$

Trong đó:

- Lực cản lăn: $F_f = f.m.g$
- Lực cản không khí: $F_{\mathrm{W}} = 0,5.\rho.C_d.S.v(t)^2$
- Lực do dốc: $F_i = m.g.\sin\alpha$
- Lực quán tính: $F_{qt} = m.\frac{dv(t)}{dt}$

Công suất tức thời hệ truyền động cần cung cấp:

$$P(t) = F_{\Sigma}(t).v(t) \quad (2)$$

Trường hợp, hiệu suất hệ thống truyền động (η_{tt}), không lý tưởng:

$$P(t)_{thucte} = \frac{P(t)}{\eta_{tt}} \quad (3)$$

2.2. Năng lượng tiêu hao

Năng lượng tiêu hao toàn phần được tích phân theo thời gian trên toàn bộ chu trình vận tốc:

$$E_{\Sigma} = \int_{t_0}^{t_1} P(t)_{thucte}.dt + E_{pt} \quad (4)$$

E_{pt}: Phụ tải bởi các hệ thống phụ trợ khác. ☞

Trường hợp dữ liệu thu thập là rời rạc theo thời gian, thì có thể xác định:

$$E_{\sum} = \int_{t_0}^{t_1} \mathrm{P(t)}_{thucte}(t_i).\Delta t = \sum_{i=1}^{n} F_{\sum}.v_i.\Delta t \quad (5)$$

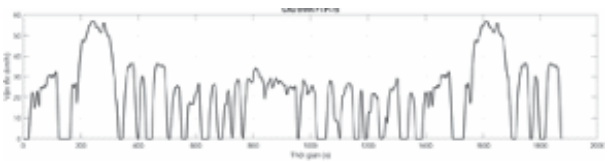
Phương trình (5) xác định năng lượng tiêu hao trong một chu trình vận tốc rời rạc, tức là đo vận tốc theo từng khoảng thời gian nhỏ Δt. Đây là cơ sở làm rõ giữa dữ liệu vận tốc thực tế và năng lượng tiêu hao. Song song đó, sai số tổng thể được kiểm soát bằng phương pháp Monte Carlo, kết hợp với đảm bảo sai số đo vận tốc ≤ 0,1 km/h từ thiết bị đo SIRIUS R2DB DEWESoft [6].

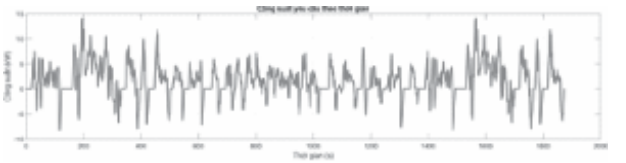
2.3. Xác định chu trình hoạt động của phương tiện

Chu trình hoạt động là biên dạng vận tốc - thời gian mô phỏng điều kiện vận hành thực tế của phương tiện, bao gồm các pha tăng tốc, giảm tốc, duy trì vận tốc, và dừng đỗ. Chu trình này phản ánh tương tác phức tạp giữa phương tiện, cơ sở hạ tầng (giao lộ, mật độ giao thông,…), và phương pháp điều khiển của người lái [9]. Trong bài báo này đã thu thập được dữ liệu từ các chu trình như sau:

2.3.1. Chu trình FTP 75

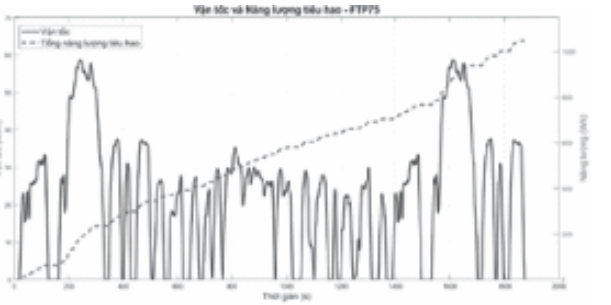
Chu trình FTP75 – một chu trình tiêu chuẩn mô tả vận hành của ô tô trong đô thị, được sử dụng trong đánh giá hiệu suất nhiên liệu phương tiện [5].





Hình 2. Đồ thị vận tốc - công suất theo thời gian, chu trình FTP75

Từ đồ thị, ta thấy vận tốc thay đổi liên tục theo thời gian chu trình, bao gồm: tăng, giảm tốc nhanh và dừng với phạm vi từ 0 - 60km/h. Phản ánh hoạt động điều khiển với các yếu tố tác động từ môi trường xung quanh khác: cơ sở hạ tầng giao thông, chướng ngại vật hay kể cả tình huống ưu tiên vận hành nhiệm vụ. Bên cạnh đó, công suất yêu cầu theo thời gian cũng phản ánh năng lượng cần thiết cho chuyển động.



Hình 3. Đồ thị giữa vận tốc và năng lượng tiêu hao, theo FTP75

Từ đồ thị, ta thấy vận tốc biến thiên càng lớn dẫn đến năng lượng tiêu hao càng nhiều. Mức năng lượng tiêu hao là 68 Wh/km, chỉ số để so sánh hiệu quả năng lượng giữa phương tiện và điều kiện vận hành khác nhau. Vì vậy, gia tốc và phanh là những yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu suất năng lượng.

2.3.2. Chu trình thực tế

Để thử nghiệm bám sát với tình hình giao thông tại Việt Nam. Xe thử nghiệm có gắn thiết bị SIRIUS R2DB DEWESoft, có độ phân

giải theo thời gian 1kHz, cho phép lấy mẫu 1000 điểm/s và dữ liệu vận tốc được làm bộ lọc Kalman để lọc nhiễu bởi các yếu tố môi trường như tình trạng mặt đường, hay nhiều cây xanh [6] để thu thập dữ liệu vận tốc, quãng đường theo thời gian thực.



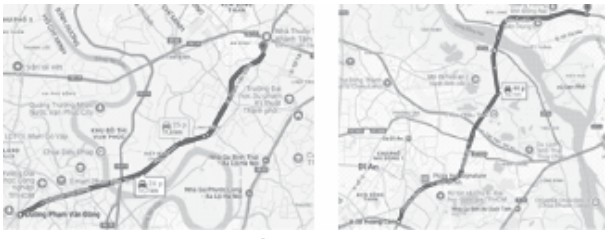
Hình 4. Xe thực nghiệm và thiết bị đo vận tốc

Chu trình được thực hiện như sau:

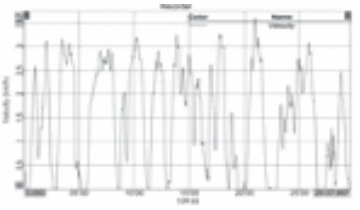
- Chu trình 1: Xác định chu trình hoạt động của xe buýt trong phạm vi đô thị bằng cách vận hành xe thử nghiệm tương tự theo sau xe buýt tuyến số 50.

- Chu trình 2: Xác định chu trình hoạt động cá nhân vận hành trong đô thị.

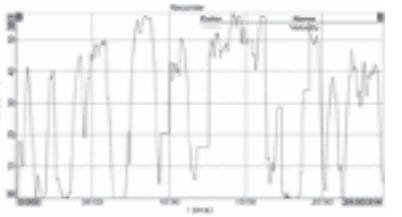
- Chu trình 3: Tương tự như chu trình 2, nhưng vận hành ngoài phạm vi đô thị.



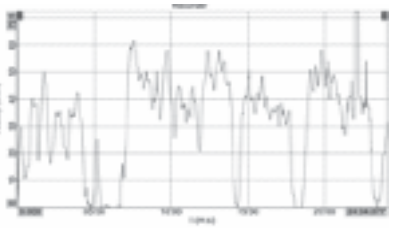
Hình 5. Bản đồ cung đường khảo sát



a) Chu trình 1



b) Chu trình 2



c) Chu trình 3

Hình 6. Đồ thị vận tốc theo thời gian với 3 chu trình thực nghiệm

Để làm nền tảng cho việc so sánh về tiêu hao năng lượng. Chu trình 1 và chu trình 2 được thực hiện trên cùng một lộ trình, chu trình 3 được thực hiện lộ trình ngoài đô thị nhưng có quãng đường gần tương đương chu trình 1 và 2.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để thực hiện khảo sát, nhóm nghiên cứu đã sử dụng ô tô có thông số được thể hiện trong bảng 1, làm phương tiện khảo sát các chu trình hoạt động.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật xe thử nghiệm

Tên	Thông số
Kiểu xe/Số chỗ	MPV 7 chỗ
Kích thước Dài x Rộng x Cao (mm)	4.475 x 1.750 x 1.700
Khoảng sáng gầm xe (mm)	205
Công suất cực đại (kW)	78 tại 6000 vòng/phút
Moment cực đại (Nm)	138 tại 4200 vòng/phút
Khối lượng không tải (kg)	1160
Hệ dẫn động	Cầu trước (FW)
Hộp số	Vô cấp CVT

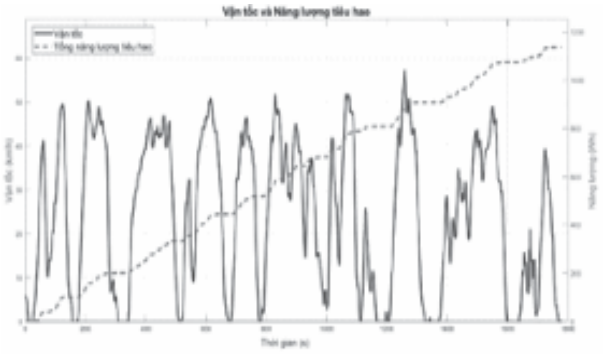
Kết quả thử nghiệm các chu trình, các thông số đặc trưng được thể hiện trong bảng sau:

Bảng 2. Thông số các chu trình thử nghiệm

Thông số	Chu trình 1	Chu trình 2	Chu trình 3	Chu trình FTP-75
Tổng năng lượng tiêu hao (Wh)	1137.74	1119.11	1130.46	1047.82
Tổng quãng đường (km)	11.95	11.62	11.80	11.4
Mức tiêu hao năng lượng (Wh/km)	95.17	96.30	95.80	91.91
Thời gian (s)	1777	1440	1444	1874
Vận tốc trung bình (km/h)	24.21	29.03	29.41	21.89

Từ bảng 2 thể hiện, chu trình FTP75 đạt hiệu quả năng lượng cao nhất với mức tiêu hao thấp (91.91 Wh/km) nhờ vận tốc ổn định, quãng đường vận hành ngắn và ít tăng tốc đột ngột nhưng không hiệu quả về mặt thời gian. Ngược lại, chu trình 2 có mức tiêu hao cao nhất (96.3 Wh/km) dù thời gian ngắn hơn. Chu trình xe buýt tiêu tốn nhiều năng lượng nhất do đặc trưng dừng – khởi động liên tục. Trong khi đó, chu trình 3 tuy có vận tốc trung bình cao nhất nhưng vẫn giữ mức tiêu hao tương đối thấp so với 2 chu trình thực tế còn lại, cho thấy tính ổn định giúp cải thiện hiệu suất. Điều đó, kiểm chứng cho giải pháp cần ưu tiên phương án điều khiển vận hành mượt mà, hạn chế tăng - giảm tốc đột ngột.

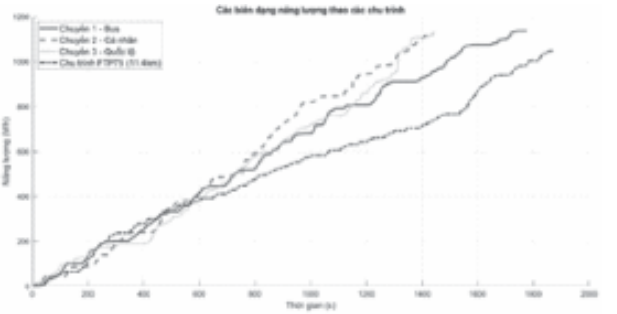
- Kết quả khảo sát của chu trình 1: Xe buýt trong đô thị.



Hình 7. Đồ thị vận tốc, thời gian năng lượng tiêu hao theo chu trình 1

Từ đồ thị, cho thấy sự đặc trưng của điều kiện lái xe trong đô thị, đường cong năng lượng không tuyến tính hoàn toàn với nhiều pha tăng – giảm tốc. Có những đoạn vận tốc tăng nhanh lên khoảng 50-60 km/h, sau đó giảm về gần 0, lặp lại nhiều lần. Dẫn đến tiêu tốn năng lượng lớn. Đồng thời, thấy được quá trình thực nghiệm có kết quả tương tự như chu trình FTP75.

Kết quả quá trình tiêu hao năng lượng của 4 chu trình như sau:



Hình 8. Đồ thị các biên dạng năng lượng với các chu trình khác nhau

Đồ thị thể hiện năng lượng tiêu thụ cho 4 chu trình vận tốc:

- Chu trình 1 (đường nét liền): Có dạng tăng bậc, thể hiện trạng thái dừng và tăng tốc rõ rệt, bởi lộ trình xe buýt với các trạm dừng theo quy định.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

- Chu trình 2 (đường nét đứt đoạn): Năng lượng tiêu hao tăng nhanh so với các chu trình khác từ khoảng 400-1200s. Mức tiêu hao cao, tăng tốc nhiều.

- Chu trình 3 (đường nét chấm): Tăng tốc ổn định, ít trạng thái phanh, giảm tốc cho nên hiệu suất năng lượng cao. Điều này, đặc trưng bởi điều kiện vận hành ít giao lộ hay giảm lược đèn tín hiệu.

- Chu trình FTP75 (đường chấm gạch): Mức tiêu hao thấp nhất trong tất cả chu trình, nhưng hoàn thành chu trình với thời gian dài hơn, quãng đường ngắn hơn, vận tốc trung bình thấp do đó tổng năng lượng tổn hao nhỏ hơn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được phương pháp đánh giá mức tiêu hao năng lượng của ô tô dựa trên chu trình hoạt động thực tế, thông qua mô hình động lực học chuyển động thẳng và các chu trình thu thập bằng thiết bị đo tốc độ. Kết quả cho thấy, chu trình vận hành thực tế tạo ra mức tiêu hao cao hơn bởi sự không ổn định. Mặc khác, chu trình 3 cho thấy sự hiệu quả hơn nhờ tốc độ ổn định và ít pha phanh. Điều đó, thể hiện mức tiêu hao năng lượng phụ thuộc vào tần suất tăng – giảm tốc và dừng đỗ, hay mở rộng ra là các yếu tố động lực học chuyển động. Từ đó, kết quả nghiên cứu là cơ sở ứng dụng để đánh giá hiệu quả sử dụng ô tô và phục vụ phát triển các thuật toán tối ưu hóa năng lượng phương tiện thông qua việc kiểm soát động lực học chuyển động ô tô.❖

Ngày nhận bài: **03/4/2025**
Ngày phản biện: **23/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Mai Phước Trải, Nguyễn Văn Tổng Em, Mai Chí Khanh, Huỳnh Đình Văn (2024), "*Nghiên cứu mô phỏng và khảo sát mức tiêu thụ năng lượng ô tô điện*". Tạp chí Khoa học và Kinh tế Phát triển. Trường Đại học Nam Cần Thơ. ISSN: 2588 1272, số 28.

[2]. Lê Văn Tụy, Nguyễn Văn Đông (2021), "*Giải pháp công nghệ để giảm tiêu hao nhiên liệu cho ô tô sử dụng hộp số tự động AT*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, 19(7). ISSN 1859-1531.

[3]. Lopez-Chila, R., Abad-Correa, A., & De La Cruz-Zavala, H. (2025), "*Analysis of the Influence of the Driving Modes in a Hybrid Vehicle During Urban Trips to Determine the Fuel Consumption Rate per Kilometer Driven*". https://doi.org/10.20944/preprints202502.0020.v1

[4]. Wongsapai, W., Janpoom, K., Katongtung, T., Mona, Y., Tippayawong, N., & Suttakul, P. (2023), "*Estimating Energy Consumption of Battery Electric Vehicles Using Vehicle Sensor Data and Machine Learning Approaches*". *Energies*, *16*(17), 6351. https://doi.org/10.3390/en16176351

[5]. U.S. Environmental Protection Agency, "*EPA Federal Test Procedure (FTP)*" [Online]. Available: https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp.

[6]. Dewesoft, SIRIUS® R2DB Portable Data Acquisition System Technical Reference Manual, ver. 24-2, 2024.

[7]. Vũ Đức Lập (cb), Nguyễn Đức Ngọc (2023). "*Giáo trình Động lực học ô tô*". NXB. Bách khoa Hà Nội.

[8]. Zhao, Z., Sun, X., Wang, X., Wang, Y., Fu, J. & Liu, J., "*Construction and optimization of representative actual driving cycles based on the improved autoencoder*". Scientific Reports 14, 52865 (2024).

[9]. Fauzi Ab Ghafar (2015), "*Driving Cycle For Small And Medium Duty Engine: Case Study of IPOH*".

TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC CƠ CẤU BA BÁNH LEO CẦU THANG CHO XE KÉO NHỎ GỌN VẬN CHUYỂN HÀNG HÓA

OPTIMIZING THE DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF A THREE-WHEEL STAIR CLIMBING MECHANISM FOR COMPACT CARGO TRANSPORT

Triệu Quý Huy
Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
Email: tqhuy@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một hướng tiếp cận đơn giản và hiệu quả trong thiết kế cơ cấu ba bánh quay thụ động dành cho xe kéo tay leo cầu thang. Phương pháp Taguchi kết hợp phân tích ANOVA và mô hình hồi quy được áp dụng để tối ưu các thông số ảnh hưởng đến mô-men xoắn yêu cầu trong quá trình leo bậc. Các biến khảo sát gồm: Tải trọng (W), bán kính cụm ba bánh (R), góc nâng tay kéo (Y). Kết quả cho thấy tải trọng là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất (93,92%). Mô hình hồi quy tuyến tính được xây dựng giúp dự đoán trước mô-men cần thiết, hỗ trợ chọn cấu hình phù hợp.

Từ khóa: *Cơ cấu ba bánh; Xe leo cầu thang; Tối ưu hóa; Mô-men xoắn; Taguchi.*

ABSTRACT

The paper presents a simple and effective approach in the design of a passive rotating three-wheel mechanism for stair climbing handcarts. The Taguchi method combined with ANOVA analysis and regression model is applied to optimize the parameters affecting the required torque during the stair climbing process. The investigated variables include: load (W), radius of the three-wheel cluster (R), and lifting angle of the handcart (Y). The results show that the load is the most influential factor (93.92%). The linear regression model is built to predict the required torque, supporting the selection of the appropriate configuration.

Keywords: *Three-wheeled mechanism; Stair climbing vehicle; Optimization; Torque; Taguchi.*

1. GIỚI THIỆU

Cơ cấu ba bánh quay (tri-star wheel) giúp xe leo bậc thang bằng chuyển động luân phiên. Khác với robot chủ động hoặc xe có truyền động hỗ trợ vốn tốn kém và cồng kềnh, thiết kế thụ động có ưu điểm đơn giản, giá thành thấp, phù hợp dân dụng [1]. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện tại vẫn thiếu đánh giá chi tiết về mô-men xoắn trong điều kiện thực tế, nhất là khi xe kéo hàng hóa qua cầu thang phổ thông (bậc cao 200 mm, góc 30° [2]).

Bài báo này hướng đến thiết kế tối ưu cho loại xe kéo tay nhỏ gọn, dễ chế tạo, sử dụng vật liệu phổ thông (thép CT3, nhựa ABS [3]), đồng thời xây dựng mô hình mô-men xoắn để phục vụ thiết kế cấu hình phù hợp.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu hình thiết kế

Mô hình gồm 3 phần:

- Cụm ba bánh quay: 3 bánh Ø230 mm lắp trên khung tam giác đều xoay quanh trục trung tâm.

- Khung xe: Thép ống CT3 hàn, có tay kéo gập.

- Trục, moay-ơ: Trục tiện ren Ø20 mm, kết hợp ổ bi.

Khi bánh đầu tiên tiếp xúc mép bậc, cụm ba bánh quay luân phiên đưa xe lên cao. Toàn bộ mô hình được dựng CAD và mô phỏng động học trên Solidworks.

2.2. Vật liệu sử dụng

Bảng 1. Lựa chọn vật liệu cho các chi tiết [4]

Bộ phận	Vật liệu	Ghi chú
Khung, tay kéo	Thép CT3	Hàn, cắt laser, sơn tĩnh điện
Trục, moay-ơ	CT3 tiện ren	Có thể mạ kẽm, tôi bề mặt
Bánh xe	ABS + cao su	Đúc nhựa, phủ cao su lưu hóa

3. PHÂN TÍCH MÔ-MEN XOẮN

3.1. Mô hình lực

Đối xứng hai bên thì mỗi cụm ba bánh chịu ½ tải trọng. Mô-men xoắn yêu cầu tính theo, [5]:

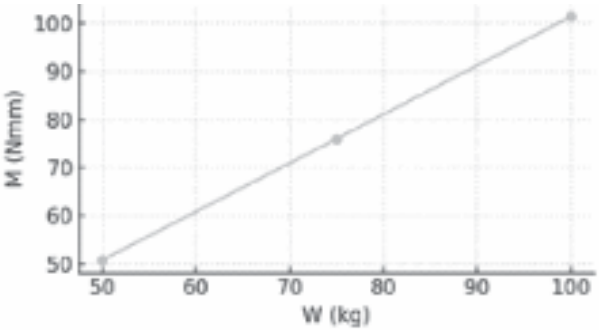
$$M = \frac{W \cdot g}{2} \cdot R \cdot \cos(Y)$$

Trong đó: W là tải trọng (kg); g = 9.81 m/s²; R là bán kính cụm bánh (m); Y là góc nâng tay (°).

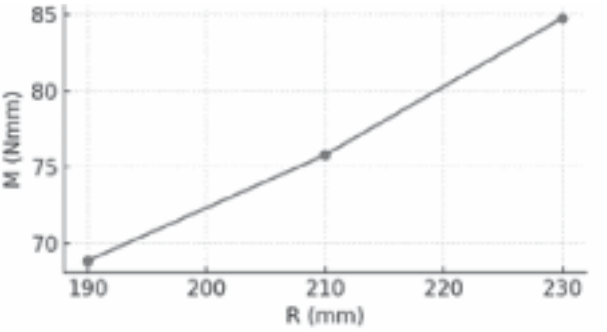
3.2. Thiết kế thí nghiệm Taguchi

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm

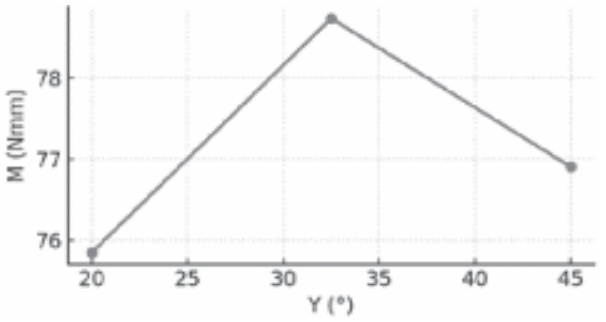
TT	W	R	Y	M (Nmm)	SNRA (Smaller is Better)
1	50	190	20	45.27	-33.12
2	50	210	32.5	51.50	-34.24
3	50	230	45	55.31	-34.86
4	75	190	32.5	69.90	-36.89
5	75	210	45	75.76	-37.59
6	75	230	20	82.20	-38.30
7	100	190	45	91.39	-39.22
8	100	210	20	100.07	-40.01
9	100	230	32.5	112.82	-41.05



Hình 1. Ảnh hưởng của trọng lực đến mô-men xoắn



Hình 2. Ảnh hưởng của bán kính bánh xe đến mô-men xoắn



Hình 3. Ảnh hưởng của góc nâng đến mô-men xoắn

3.3. Phân tích ANOVA

Bảng 3. Phân tích các thông số

Thông số	SS	Tỷ lệ ảnh hưởng (%)
W	42.149	93.92
R	2.442	5.44
Y	0.285	0.64

W là yếu tố chi phối chính.

3.4. Mô hình hồi quy

Từ dữ liệu, mô hình hồi quy tuyến tính:

$$M = 0.897W + 0.388R – 0.249Y – 96.21$$

Với: W = 50-100 kg, R = 190-230 mm, Y = 20-45°.

3.5. Mô phỏng động học và đánh giá ổn định hệ thống

Để đánh giá khả năng vận hành ổn định của cơ cấu ba bánh trong điều kiện leo cầu thang thực tế, mô hình mô phỏng động học được xây dựng trong môi trường Solidworks Motion Simulation. Mô hình này cho phép phân tích các yếu tố như chuỗi chuyển động quay, ứng suất tại trục, sự dịch chuyển trọng tâm và biến thiên mô-men xoắn trong toàn bộ chu trình leo bậc.

Cấu hình mô phỏng bao gồm: Cụm ba bánh đối xứng hai bên, mỗi cụm gồm ba bánh Ø230 mm; Khung xe hàn bằng thép CT3, có tay kéo gập; Cầu thang giả lập 5 bậc tiêu chuẩn (cao 200 mm, rộng 270 mm, nghiêng 30°); Tải trọng tĩnh 66 kg phân bố đều trên khung.

Bảng 4. Thông số điều kiện biên

Thông số	Giá trị thiết lập
Tổng tải trọng hệ thống	66 kg
Bán kính cụm ba bánh	190 mm
Góc nghiêng cầu thang	30°
Hệ số ma sát bánh – cầu thang	0.65 (cao su – bê tông thô)
Số bậc mô phỏng	5 bậc liên tục
Thời gian mô phỏng	0-2.5 s

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Kết quả mô phỏng chính:

- Mô-men xoắn cực đại xảy ra tại thời điểm bánh đầu tiên chạm mép bậc thứ nhất, trị số khoảng 68 Nm, trùng khớp với kết quả thực nghiệm.

- Dao động mô-men trong quá trình quay cụm bánh luân phiên dao động ±5% quanh cực trị, phản ánh tương tác trọng lực, phản lực khi chuyển pha tiếp xúc.

- Trọng tâm hệ thống dịch chuyển tuyến tính theo phương thẳng đứng, biên độ dao động nhỏ hơn 20 mm, đảm bảo ổn định tĩnh và động trong quá trình leo bậc.

- Phản lực tại trục quay đạt giá trị lớn nhất khoảng 245 N mỗi bên, nằm trong giới hạn cho phép của trục Ø20 mm bằng thép CT3 (ứng suất xoắn < 90 MPa).

Nhận xét:

- Cơ cấu vận hành êm, chuyển động quay cụm ba bánh liền mạch, không xuất hiện hiện tượng nảy hoặc lật xe.

- Độ lệch giữa mô hình mô phỏng và kết quả thực nghiệm dưới 5%, xác nhận tính tin cậy của mô hình.

- Thiết kế phù hợp với điều kiện ứng dụng dân dụng, không yêu cầu kiểm soát chủ động phức tạp.

- Có thể nâng cao độ chính xác mô phỏng trong tương lai bằng cách kết hợp phân tích phần tử hữu hạn (FEA) tại các điểm chịu tải lớn như mối hàn, trục quay và cụm bánh.

4. KẾT LUẬN

- Tải trọng là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến mô-men yêu cầu → cần tối ưu khối lượng hàng và kết cấu xe.

- Bán kính cụm bánh cần đủ lớn để vượt bậc nhưng tránh làm tăng mô-men quá mức.

- Góc nâng tay kéo có thể linh hoạt thiết kế theo công thái học.

- Mô hình hồi quy tuyến tính giúp dự đoán lực yêu cầu nhanh chóng và chính xác, hỗ trợ thiết kế cấu hình phù hợp.

- Nghiên cứu mở ra hướng phát triển các thiết bị hỗ trợ vận chuyển dân dụng đơn giản, hiệu quả, tiết kiệm và có khả năng sản xuất hàng loạt nội địa.❖

Ngày nhận bài: **24/4/2025**
Ngày phản biện: **12/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Chen & Zhang (2017), J. Mechanical Engineering Science.
[2]. Kim et al. (2019), Int. J. Mechanical Systems.
[3]. Yu & Zhao (2021), Journal of Automation and Control Engineering.
[4]. Watanabe & Asaka (2016), IEEE Trans. Mechatronics.
[5]. Dertien & Stramigioli (2011), IEEE Conf. Robotics and Automation.

NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA HỆ THỐNG ĐO ĐỘ PHẲNG KHÔNG TIẾP XÚC BẰNG CÔNG NGHỆ ĐỆM KHÍ

ENHANCING THE ACCURACY OF NON-CONTACT SURFACE FLATNESS MEASUREMENT SYSTEMS USING AIR BEARING TECHNOLOGY

Trương Minh Đức[1], Hoàng Đức Cường[2], Vũ Toàn Thắng[2]
[1]Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
[2]Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: thang.vutoan@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bảo đảm độ phẳng bề mặt là yêu cầu then chốt trong chế tạo cơ khí chính xác, đặc biệt tại các vị trí lắp ghép, truyền lực hoặc yêu cầu độ kín cao. Nghiên cứu này đề xuất một hệ thống đo độ phẳng không tiếp xúc tích hợp đầu đo laser vào thiết bị đo sử dụng hệ thống đệm khí. Khác với các cơ cấu truyền động cơ học truyền thống, việc ứng dụng đệm khí giúp giảm thiểu ma sát, hạn chế dao động vi mô và tăng độ ổn định khi di chuyển đầu đo. Dữ liệu đo được thu thập qua hệ thống điều khiển sử dụng Arduino và xử lý bằng phần mềm lập trình tùy biến trên Matlab. Thử nghiệm thực tế trên các chi tiết gia công cho thấy hệ thống đạt độ lặp lại cao và sai số đo nhỏ. Kết quả nghiên cứu thể hiện tính mới trong việc tận dụng kết hợp công nghệ đệm khí với đo không tiếp xúc, đồng thời khẳng định tiềm năng ứng dụng trong thiết kế các hệ thống đo thông minh, linh hoạt, đáp ứng yêu cầu sản xuất hiện đại.

Từ khóa: *Đo độ phẳng bề mặt; Hệ thống đệm khí; Cảm biến laser; Kiểm tra chính xác; Đo lường không tiếp xúc.*

ABSTRACT

Ensuring surface flatness is a critical requirement in precision mechanical manufacturing, especially at assembly interfaces, load transmission areas, or locations demanding high sealing performance. This study proposes a non-contact flatness measurement system by integrating a laser displacement sensor into a measuring device equipped with an air bearing system. Unlike conventional mechanical drive structures, the application of air bearings significantly reduces friction, minimizes micro-vibrations, and enhances stability during probe movement. Measurement data is acquired through a control system based on Arduino and processed using a customized algorithm developed in Matlab. Experimental validation on machined parts demonstrates high repeatability and low measurement error. The research highlights a novel approach that combines air bearing technology with non-contact measurement, and confirms its potential for developing intelligent, flexible metrology systems that meet the demands of modern manufacturing environments.

Keywords: *Surface flatness measurement; Air bearing system; Laser sensor; Precision inspection; Non-contact metrology.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh sản xuất cơ khí hiện đại, yêu cầu về độ chính xác hình học ngày càng trở nên nghiêm ngặt, đặc biệt với các chi tiết có bề mặt lắp ghép, truyền động hoặc cần độ kín khít cao. Trong số các thông số kiểm tra hình học, độ phẳng bề mặt là một chỉ tiêu quan trọng có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng lắp ráp và vận hành của sản phẩm. Tuy nhiên, hầu hết các phương pháp đo truyền thống vẫn chủ yếu dựa vào tiếp xúc cơ học, vốn tồn tại nhiều hạn chế như ma sát, độ mòn đầu đo, và khó đảm bảo độ chính xác khi đo các bề mặt mỏng, mềm hoặc có hình dạng phức tạp.

Trước thực tế đó, các hướng tiếp cận đo không tiếp xúc sử dụng cảm biến laser đang được quan tâm phát triển để nâng cao độ chính xác và mở rộng khả năng ứng dụng trong các dây chuyền kiểm tra tự động. Đồng thời, để đảm bảo sự ổn định trong quá trình di chuyển đầu đo, việc ứng dụng đệm khí như một giải pháp thay thế cho hệ dẫn động cơ khí truyền thống đang được xem là hướng tiếp cận hiệu quả. Các nghiên cứu gần đây như [1], [2] đã chỉ ra rằng ổ đệm khí có khả năng giảm thiểu dao động vi mô, triệt tiêu ma sát tiếp xúc, từ đó góp phần nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong các hệ thống đo siêu chính xác.

Tuy nhiên, đa phần các công trình hiện tại mới tập trung vào tối ưu hóa đệm khí trong môi trường chân không [1] hoặc trong các thiết bị đo tích hợp có giá thành cao và phức tạp [3], [4], [5]. Việc tận dụng các thiết bị đo hiện có như máy đo tọa độ ba chiều (CMM) thế hệ cũ để tích hợp hệ thống cảm biến laser và điều khiển mới, kết hợp với cơ cấu dẫn động đệm khí, vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống và có tính thực nghiệm cao. Đây là khoảng trống mà bài báo này hướng đến.

Nghiên cứu đề xuất một phương pháp thiết kế và xây dựng hệ thống đo độ phẳng không tiếp xúc bằng cách tích hợp cảm biến laser vào máy CMM sử dụng đệm khí, với mục tiêu tận dụng thiết bị sẵn có và cải thiện hiệu năng đo. Hệ thống được điều khiển bằng vi điều khiển Arduino và phần mềm xử lý dữ liệu lập trình trên Matlab. Bài báo không chỉ trình bày quy trình thiết kế, hiệu chỉnh, mà còn thực hiện thử nghiệm thực tế nhằm đánh giá độ lặp lại, sai số và tính ổn định của hệ thống, từ đó khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tiễn trong các cơ sở sản xuất vừa và nhỏ.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Đo độ phẳng bằng phương pháp không tiếp xúc

Trong đo lường kỹ thuật, độ phẳng là một trong những chỉ tiêu hình học quan trọng, ảnh hưởng đến khả năng lắp ghép, phân bố ứng suất và độ kín khít trong tổ hợp cơ khí. Các phương pháp đo tiếp xúc truyền thống tuy có độ tin cậy cao nhưng thường bị giới hạn bởi ma sát đầu đo, áp lực tiếp xúc, và khả năng đo trên bề mặt có độ nhám thấp hoặc mềm.

Sự phát triển của công nghệ cảm biến quang học, đặc biệt là cảm biến laser dịch chuyển, đã mở ra hướng đo không tiếp xúc với độ chính xác cao, đáp ứng yêu cầu trong đo bề mặt phức tạp, mỏng hoặc dễ biến dạng. Các hệ thống này thường dựa trên nguyên lý tam giác laser hoặc giao thoa quang học, cho phép thu nhận dữ liệu hình học bề mặt với độ phân giải micromet và tốc độ cao [6]. Theo Wang et al. (2020), việc tích hợp cảm biến laser kép có thể nâng cao độ chính xác trong giám sát độ phẳng trực tuyến tấm kim loại, đồng thời cải thiện khả năng khử nhiễu nhờ kết hợp thuật toán xử lý tín hiệu [7]. ☞

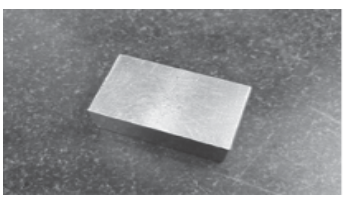
2.2. Ứng dụng đệm khí trong hệ thống đo

Đệm khí là một giải pháp công nghệ tiên tiến thay thế cho các ổ dẫn động cơ khí truyền thống trong môi trường yêu cầu độ chính xác cao. Với đặc điểm không tiếp xúc, ổ đệm khí tạo ra một lớp màng khí mỏng giữa bề mặt chuyển động và mặt dẫn hướng, giúp triệt tiêu hoàn toàn ma sát và dao động cơ học trong quá trình chuyển động tuyến tính hoặc quay.

Fan et al. (2024) đã chứng minh rằng ổ đệm khí vi lỗ có thể duy trì độ ổn định cao ngay cả trong môi trường chân không, qua đó làm rõ tiềm năng của đệm khí trong hệ thống đo lường siêu chính xác [1]. Trong khi đó, Zhang et al. (2023) đã ứng dụng lưới khí vi lưu để cải thiện độ phẳng khi xử lý vật liệu kính ITO, mở rộng khả năng kiểm soát biến dạng bề mặt nhờ điều áp cục bộ [2]. Đặc biệt, đệm khí được sử dụng phổ biến trong các hệ thống định vị tuyến tính phục vụ cho máy đo tọa độ (CMM), hệ thống wafer, và thiết bị in vi mô [8].

2.3. Tích hợp cảm biến laser và cơ cấu đệm khí trên CMM

Hệ thống máy đo tọa độ ba chiều (CMM) là công cụ đo kiểm hình học quan trọng trong các dây chuyền sản xuất tự động. Tuy nhiên, nhiều hệ thống CMM thế hệ cũ sử dụng cơ cấu dẫn động bằng ổ bi cơ học, tiềm ẩn nhiều sai số do ma sát và rung động. Việc tích hợp đồng thời cảm biến đo không tiếp xúc và đệm khí là hướng cải tiến mới nhằm tái sử dụng thiết bị cũ, giảm chi phí đầu tư và nâng cao hiệu năng đo.



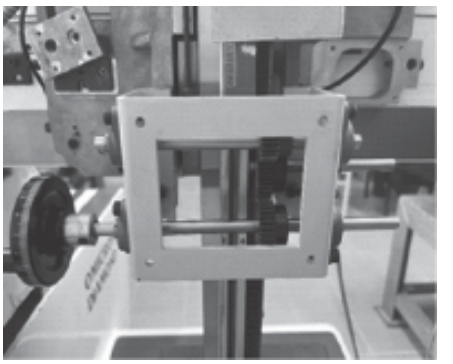
Hình 1. Chi tiết phẳng cần đo

Theo Jiang et al. (2020), xu hướng tích hợp hệ đo vào chính máy gia công đã và đang hình thành một thế hệ thiết bị "đo tại chỗ" (on-machine measurement), trong đó các yếu tố như dẫn động không ma sát và thu nhận tín hiệu quang học đóng vai trò cốt lõi [3]. Việc này không chỉ giúp giảm thời gian thao tác, mà còn cải thiện tính ổn định và tái lập của kết quả đo. Kim & Choi (2023) cũng chỉ ra rằng các hệ thống định vị tuyến tính sử dụng đệm khí có thể đạt độ lặp lại dưới 0.1 μm trong môi trường phòng sạch, mở ra khả năng ứng dụng trong các dây chuyền đo thông minh hiện đại [9].

3. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG

Hệ thống đo độ phẳng được xây dựng trên nền tảng máy CMM Omicron DEA có sẵn, kết hợp nâng cấp cả phần cơ khí và phần thu nhận – xử lý tín hiệu để đáp ứng yêu cầu đo không tiếp xúc độ chính xác cao.

3.1. Thiết kế cơ khí



Hình 2. Hệ thống dẫn động trục Z

Do yêu cầu điều chỉnh chính xác trục Z ở mức micromet và đảm bảo cố định trong suốt quá trình đo, nhóm tác giả đã thiết kế thêm hệ thống dẫn động trục Z sử dụng thanh răng – bánh răng. Điều này giúp vận hành trơn tru mà không ảnh hưởng đến kết cấu nguyên bản của máy đo.

3.2. Tích hợp đầu đo laser

Đầu đo laser ZX-L-N được gá trực tiếp lên trục Z thông qua hệ thống gá cơ khí tùy biến (Hình 3), cho phép điều chỉnh hướng và khoảng cách đo phù hợp với từng bề mặt chi tiết. Dải đo của cảm biến là 28-32 mm với độ phân giải dưới 5 µm.



Hình 3. Gá đầu đo laser lên trục Z

3.3. Thu nhận và xử lý tín hiệu

Tín hiệu đo được thu thông qua bộ điều khiển Arduino Mega 2560 và truyền về phần mềm xử lý Matlab. Giao diện được thiết kế để hiển thị đám mây điểm, tính độ phẳng theo thuật toán bình phương tối thiểu và cho phép lưu trữ dữ liệu dưới dạng Excel phục vụ phân tích.



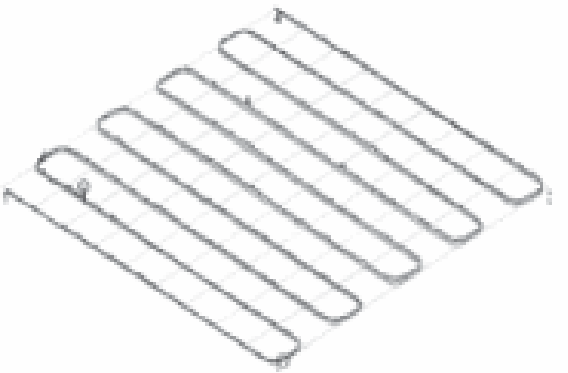
Hình 4. Giao diện PLX-DAQ

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Quy trình đo thực nghiệm

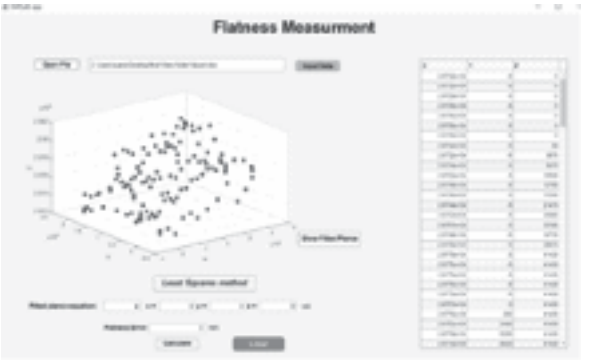
Để đánh giá hiệu quả của hệ thống đo không tiếp xúc sử dụng đệm khí, nhóm nghiên cứu đã xây dựng quy trình đo thực nghiệm gồm 9 bước chính, từ hiệu chỉnh vị trí cảm biến laser đến xử lý dữ liệu trên phần mềm Matlab.

Trước tiên, cảm biến laser được gá đặt chính xác lên trục Z của máy đo CMM. Sau đó, phần mềm PLX-DAQ được kết nối với Arduino để bắt đầu thu nhận dữ liệu vị trí và độ cao tại các điểm đo. Đầu đo di chuyển trên mặt chi tiết theo mô hình zigzag nhằm bao phủ đều toàn bộ bề mặt, số lượng điểm đo khoảng từ 200-300 điểm mỗi lần đo, bảo đảm mật độ điểm và tính đại diện cho toàn bộ mặt phẳng.



Hình 5. Sơ đồ đo quét chi tiết

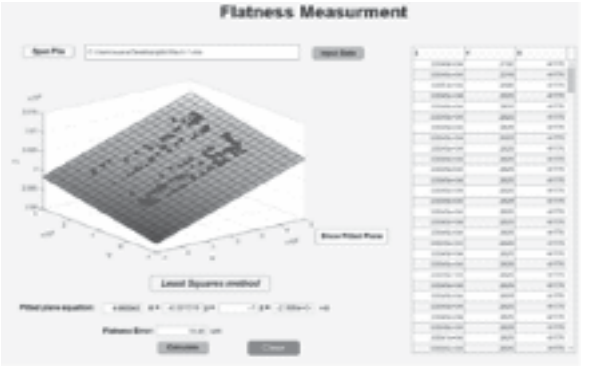
Sau khi hoàn tất việc thu dữ liệu trên Excel, file sẽ được nhập vào phần mềm Matlab thông qua giao diện Flatness Measurement (Hình 6). Phần mềm sẽ tính toán mặt phẳng chuẩn bằng thuật toán bình phương tối thiểu và hiển thị sai lệch phẳng trên đồ thị 3D. Độ phẳng được tính là chênh lệch giữa điểm cao nhất và thấp nhất so với mặt phẳng chuẩn. ☞



Hình 6. Nhập dữ liệu vào Flatness Measurement

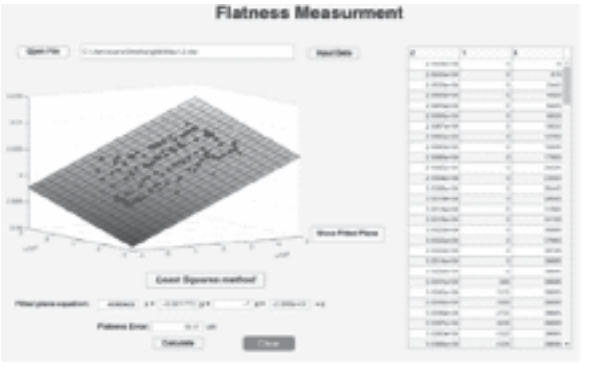
Với mỗi mẫu, ta sẽ đo 5 lần bề mặt để lấy kết quả một cách chính xác nhất.

Tốc độ lấy mẫu: 200ms/lần; Tổng số điểm đo: 306 điểm; Độ lệch phẳng: 59.49µm.



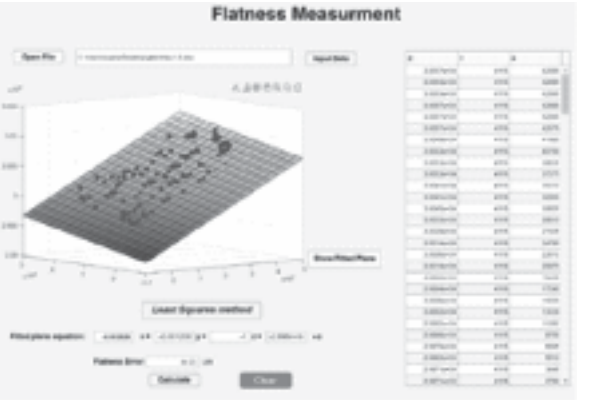
Hình 7. Kết quả đo lần 1

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 205 điểm; Độ lệch phẳng: 56.01µm.



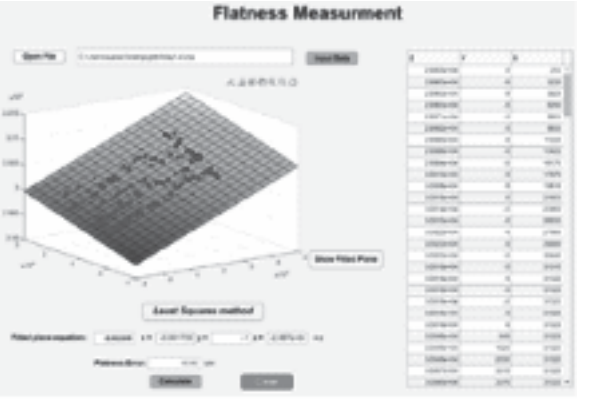
Hình 8. Kết quả đo lần 2

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 212 điểm; Độ lệch phẳng: 44.23µm.



Hình 9. Kết quả đo lần 3

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 198 điểm; Độ lệch phẳng: 55.95µm.



Hình 10. Kết quả đo lần 5

Tốc độ lấy mẫu: 500ms/lần; Tổng số điểm đo: 225 điểm; Độ lệch phẳng: 50.12µm.

4.2. KẾT LUẬN

Mẫu đo có kích thước 48 × 27 × 18 mm được tiến hành đo độ phẳng 5 lần liên tiếp để kiểm tra độ ổn định và độ lặp lại của hệ thống. Kết quả cho thấy giá trị độ phẳng thu được dao động trong khoảng từ 44.23 µm đến 59.49 µm, với độ lệch trung bình khoảng 53.16 µm. Sự sai lệch giữa các lần đo không vượt quá 15 µm,

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

chứng tỏ độ lặp lại tốt và hệ thống có khả năng vận hành ổn định.

Dữ liệu đo cũng cho thấy mô hình mặt phẳng được tái lập khá nhất quán qua các lần thử, thể hiện qua hình ảnh hiển thị từ phần mềm Flatness Measurement. Sai số ngẫu nhiên chủ yếu đến từ yếu tố thao tác thủ công khi dịch chuyển đầu đo và dao động môi trường, nhưng không gây ảnh hưởng lớn đến xu hướng kết quả. Kết luận cho thấy hệ thống đo đề xuất hoàn toàn có thể ứng dụng trong đánh giá độ phẳng cơ bản cho các chi tiết kích thước nhỏ đến trung bình trong điều kiện sản xuất cơ khí phổ thông.

Kết quả đo thực nghiệm cho thấy hệ thống tích hợp cảm biến laser và đệm khí hoạt động ổn định, với độ lệch phẳng trung bình khoảng 53.16 µm và độ lặp lại tốt giữa các lần đo. Sự nhất quán của dữ liệu qua 5 lần thử nghiệm khẳng định tính tin cậy của quá trình thu nhận và xử lý tín hiệu.

Việc ứng dụng đệm khí đã giúp giảm ma sát và hạn chế dao động vi mô, cải thiện độ ổn định trong quá trình dịch chuyển đầu đo. Giao diện phần mềm xử lý trên Matlab cho phép hiển thị trực quan và tính toán độ phẳng nhanh chóng, thuận tiện cho đánh giá kỹ thuật.

Tuy vẫn còn ảnh hưởng nhất định từ thao tác thủ công, hệ thống cho thấy tiềm năng ứng dụng cao trong kiểm tra độ phẳng chi tiết cơ khí kích thước nhỏ – trung bình. Đây là giải pháp phù hợp cho các cơ sở sản xuất có nhu cầu nâng cấp thiết bị đo truyền thống với chi phí hợp lý.❖

Ngày nhận bài: **25/4/2025**
Ngày phản biện: **14/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Guozhen Fan, Youhua Li and Yuehua Li, "*Research on Design and Optimization of Micro-Hole Aerostatic Bearing in Vacuum Environment*". Lubricants, 12(6), 224. https://doi.org/10.3390/lubricants12060224.

[2]. Zhang, Y., et al. (2023), "*Improving Etched Flatness by Micro Airflow Array Pressurization in ITO Glass Laser Machining*". Micromachines, 14(3), 676. https://doi.org/10.3390/mi14030676.

[3]. Jiang, X., Tong, Z., & Li, D. (2020), "*On-Machine Measurement System in Ultra-Precision Manufacturing*". In Precision Machines, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0381-4_16.

[4]. Wang, Y., et al. (2020), "*Optical Dual Laser Sensor Denoising for Flatness Estimation*". Sensors, 20(18), 5441. https://doi.org/10.3390/s20185441.

[5]. Zhang, X., et al. (2020), "*Focus Variation Measurement for Ultra-Precision Machining*". Int. J. Adv. Manuf. Technol., 107, 3575-3586. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05767-z.

[6]. Zhang, X., et al. (2020), "*Focus Variation Measurement for Ultra-Precision Machinin*g". Int. J. Adv. Manuf. Technol., 107, 3575-3586. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05767-z.

[7]. Wang, Y., et al. (2020), "*Optical Dual Laser Sensor Denoising for Online Metal Sheet Flatness Estimation*". Sensors, 20(18), 5441. https://doi.org/10.3390/s20185441.

[8]. Li, B. (2020), "*Assembly Techniques of Precision Machines*". In Precision Machines, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0381-4_29.

[9]. Kim, J., & Choi, Y. (2023), "*Development of High-Precision Air Bearing Linear Stages for Nanometer-Scale Positioning Systems*". Applied Sciences, 13(7), 4012. https://doi.org/10.3390/app13074012.

ỨNG DỤNG MATLAB – SIMULINK MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC XE HYBRID SỬ DỤNG HỘP SỐ KIỂU HAI CHẾ ĐỘ

MATLAB – SIMULINK APPLICATION TO SIMULATE HYBRID VEHICLE POWER TRANSPORT SYSTEM USING DUAL-MODE TRANSMISSION

Lưu Thế Duyệt, Đồng Minh Tuấn*, Khổng Văn Nguyên, Trần Bùi Bông
Khoa Cơ khí Động lực, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên
**Email: tuangiabonhi@gmail.com*

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, hệ thống truyền lực sử dụng hộp số kiểu hai chế độ đã và đang được các hãng xe nghiên cứu và ứng dụng trên các dòng xe hybrid khác nhau. Bài báo trình bày những kết quả chính trong việc nghiên cứu quá trình truyền lực trên ô tô hybrid, quá trình phối hợp các nguồn công suất của hộp số kiểu hai chế độ. Đồng thời, thực hiện mô phỏng hệ thống bằng phần mềm MATLAB - SIMULINK. Bài báo đã trình bày kết quả mô phỏng nhằm mục đích phân tích, đánh giá đặc tính hệ thống truyền lực xe hybrid. Các kết quả mô phỏng cho thấy xe hybrid sử dụng hộp số kiểu hai chế độ kiểm soát quá trình phối hợp nguồn công suất hiệu quả hơn các xe sử dụng hệ thống truyền lực thông thường. Việc tối ưu hóa quá trình phối hợp nguồn công suất là một trong các yếu tố giúp cải thiện tính năng kinh tế nhiên liệu và ô nhiễm môi trường.

Từ khóa: *Xe hybrid; Xe hybrid sử dụng hộp số kiểu hai chế độ; Hệ thống truyền lực.*

ABSTRACT

In recent years, car manufacturers have researched and applied the powertrain system using dual-mode gearboxes on various hybrid vehicles. This article presents the main results in the study of the powertrain process on hybrid vehicles, the process of coordinating the power sources of dual-mode gearboxes. At the same time, the system is simulated using MATLAB-SIMULINK software. The article presents the simulation results to analyze and evaluate the characteristics of hybrid vehicle powertrain systems. The simulation results show that hybrid vehicles using dual-mode gearboxes control the power source coordination process more effectively than vehicles using conventional powertrains. Optimizing the power source coordination process is one of the factors that helps improve fuel economy and reduce environmental pollution.

Keywords: *Hybrid vehicles; Hybrid vehicles use dual-mode transmissions; Powertrains.*

Các từ viết tắt:

TT	Ký hiệu	Ý nghĩa
1	ICE	Động cơ đốt trong
2	HEV	Ô tô hybrid
3	MG1, MG2	Động cơ/máy phát điện số 1 và 2
4	PG1, PG2, PG3	Bộ hành tinh thứ nhất, thứ hai, thứ ba
5	FG1, FG2, FG3, FG4	Tỉ số truyền cố định số 1, 2, 3, 4
6	EV1, EV2	Chế độ hoạt động khi xe chạy trong dải tốc độ thấp, cao

1. TỔNG QUAN

Hiện nay, với sự gia tăng nhanh chóng số lượng ô tô khiến mức tiêu thụ nhiên liệu hóa thạch truyền thống tăng cao gây nguy cơ cạn kiệt nhanh nguồn nhiên liệu này [1]. Mặt khác, nguồn ô nhiễm chiếm tỉ lệ lớn nhất đến từ các phương tiện giao thông sử dụng động cơ truyền thống. Trong quá trình làm việc, động cơ truyền thống phát sinh ra nhiều thành phần khí thải độc hại như: CO, HC, NOx, SOx,… có ảnh hưởng xấu đến môi trường và sức khỏe con người [2].

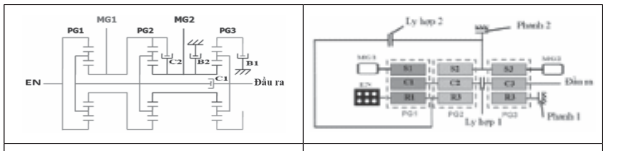
Để đạt được mục tiêu giảm tiêu hao nhiên liệu và phát thải môi trường, các dòng xe chạy bằng điện và pin nhiên liệu đã được đầu tư nghiên cứu và phát triển [3]. Tuy nhiên, công nghệ này rất phức tạp, chi phí sản xuất lớn không thể đáp ứng tất cả các nhu cầu khác nhau liên quan đến khả năng di chuyển cá nhân, tính bền vững và tính khả thi. Trong giai đoạn hiện nay, xe hybrid có ý nghĩa quan trọng và đóng vai trò là phương tiện chuyển tiếp từ các dòng xe truyền thống sang lĩnh vực xe năng lượng mới (năng lượng xanh).

Bài báo tập trung nghiên cứu về phương thức kết hợp nguồn công suất trên hệ thống truyền lực hybrid sử dụng hộp số hai chế độ trên ô tô hiện nay. Đồng thời, tiến hành mô phỏng bằng phần mềm chuyên dụng nhằm làm rõ quy luật vật lý xảy ra trong hệ thống.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Hệ thống truyền lực xe hybrid sử dụng hộp số hai chế độ

Hệ thống truyền lực của xe hybrid loại này sử dụng hộp số tự động vô cấp với ba bộ bánh răng hành tinh, kết hợp với hai phanh và hai bộ ly hợp. Khi nối hoặc ngắt các phanh, các ly hợp tùy theo trạng thái hoạt động của xe sẽ tạo ra sáu chế độ hoạt động khác nhau bao gồm: chế độ EV1, chế độ EV2 và bốn chế độ tỉ số truyền cố định (FG1, FG2, FG3, FG4). Cấu trúc của hộp số loại này được thể hiện trong Hình 1 [4], [7].



R1, S1, C1; R2, S2, C2; R3, S3, C3	Bánh răng bao, bánh răng mặt trời và cần dẫn bộ hành tinh thứ nhất, thứ hai, thứ 3
EN	Động cơ đốt trong
MG1, MG2	Động cơ/máy phát số 1 và 2

Hình 1. Sơ đồ hộp số hai chế độ trang bị trên xe hybrid

Hộp số hai chế độ với ba bộ hành tinh (PG1, PG2, PG3), hai động cơ điện/máy phát (MG1, MG2), hai phanh và hai bộ ly hợp. Các chế độ hoạt động thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Hoạt động của ly hợp và phanh cho HEV hai chế độ [5], [7]

TT	Trạng thái	Phanh 1	Ly hợp 1	Phanh 2	Ly hợp 2
1	EV1	Đóng	Mở	Mở	Mở
2	FG1	Đóng	Mở	Mở	Đóng
3	FG2	Đóng	Đóng	Mở	Mở
4	EV2	Mở	Đóng	Mở	Mở
5	FG3	Mở	Đóng	Mở	Đóng
6	FG4	Mở	Đóng	Đóng	Mở

2.2. Các chế độ vận hành của hộp số hai chế độ [5], [6], [7]

2.2.1. Chế độ EV1 (Chế độ phân chia công suất đầu vào)

Chế độ này được kích hoạt khi xe chạy ở tốc độ thấp. Xe ở chế độ EV1 nếu phanh 1 ở trạng thái "Đóng", còn ly hợp 1, ly hợp 2, phanh 2 được kích hoạt ở trạng thái "Mở". Các phương trình mô tả cho chế độ chia tách đầu vào (EV1) được viết như sau:

$$T_{MG1} = -\frac{1-n_1n_2}{1+n_2}T_e;\ T_{MG2} = -(1+n_1)\frac{n_2}{1+n_2}T_e + \frac{n_3}{1+n_3}T_{out} \quad (1)$$

$$\omega_{MG1} = \frac{1+n_2}{1-n_1n_2}\omega_e - n_2\frac{1+n_1}{1-n_1n_2}\frac{1+n_3}{n_3}\omega_{out};\ \omega_{MG2} = \frac{1+n_3}{n_3}\omega_{out} \quad (2)$$

$$\eta_{e1} = \frac{T_{out}}{T_e}\frac{\omega_{out}}{\omega_e} = (1+n_1+\frac{\eta_{MG2}}{\eta_{MG1}}(\rho-1-n_1))\frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Trong đó: T_{MG1}, T_{MG2}, T_e, T_{out} (N.m) lần lượt là mô men của MG1, MG2, ICE và trục đầu ra; ω_{GM1}, ω_{GM2}, ω_{out} (v/p) là tốc độ của MG1, MG2 và trục đầu ra; n_1, n_2, n_3 là tỉ số truyền của các bộ hành tinh PG1, PG2, PG3, ρ, ρ_{21}, ρ_{22} là tỉ số truyền tốc độ, η_{e1}, η_{MG1}, η_{MG2} (%) lần lượt là hiệu suất truyền của chế độ EV1 và động cơ máy phát MG1, MG2.

2.2.2. Chế độ EV2 (Chế độ phân chia hỗn hợp)

Khi tốc độ xe tăng, để có thể giảm mức tiêu hao nhiên liệu và tăng công suất đầu ra, hệ thống thực hiện chuyển từ chế độ từ EV1 sang EV2 (chế độ chia tách hỗn hợp). Chế độ EV2 được kích hoạt khi ly hợp 1 ở trạng thái "Đóng". Chế độ EV2 được diễn tả qua phương sau:

$$T_{MG1} = -\frac{1-n_1n_2}{1+n_2}T_e + \frac{1}{1+n_2}T_{out};\ T_{MG2} = -(1+n_1)\frac{n_2}{1+n_2}T_e + \frac{n_3}{1+n_3}T_{out} \quad (4)$$

$$\omega_{MG1} = -\frac{1}{n_1}\omega_e + \frac{1+n_1}{n_1}\omega_{out};\ \omega_{MG2} = -\frac{1}{n_1n_2}\omega_e - \frac{1-n_1n_2}{n_1n_2}\omega_{out} \quad (5)$$

$$\eta_{e2} = \frac{1}{\rho}\frac{\rho_{e21}(\rho-\rho_{e22})\frac{\eta_{MG2}}{\eta_{MG1}} - \rho_{e22}(\rho-\rho_{e21})}{(\rho-\rho_{e22})\frac{\eta_{MG2}}{\eta_{MG1}} - (\rho-\rho_{e21})} \quad (6)$$

Trong đó: T_{MG1}, T_{MG2}, T_e, T_{out} (N.m) lần lượt là mô men của MG1, MG2, ICE và trục đầu ra; ω_{GM1}, ω_{GM2}, ω_{out} (v/p) lần lượt là tốc độ của MG1,MG2 và trục đầu ra; n_1, n_2, n_3 là tỉ số truyền của các bộ hành tinh PG1, PG2, PG3, ρ, ρ_{21}, ρ_{22} là tỉ số truyền tốc độ, η_{e2}, η_{MG1}, η_{MG2} (%) lần lượt là hiệu suất truyền của chế độ EV2 và động cơ máy phát MG1, MG2.

2.2.3. Chế độ tỉ số truyền cố định

Chế độ tỉ số truyền cố định là chế độ trung gian khi chuyển từ EV1 sang EV2 và ngược lại. Tùy theo trạng thái đóng mở của các ly hợp và phanh, bộ hành tinh sẽ tạo ra bốn tỉ số truyền.

• Tỷ số truyền cố định số 1 (FG1): Chế độ được thực hiện khi ly hợp 2 và phanh 1 được ở trạng thái "Đóng", ly hợp số 1 và phanh 2 ở trạng thái "Mở". FG1 được sử dụng để tăng mô men xoắn đầu ra trong quá trình tăng tốc xe.

• Tỷ số truyền cố định số 2 (FG2): Chế độ được thực hiện khi ly hợp 1, phanh 1 ở trạng thái "Đóng" và ly hợp 2, phanh 2 ở trạng thái "Mở". FG2 là số chuyển tiếp từ EV1 sang chế độ EV2.

• Tỷ số truyền cố định số 3 (FG3): Chế độ được thực hiện khi ly hợp 1 và ly hợp 2 ở trạng thái "Đóng", phanh 1 và phanh 2 ở trạng thái "Mở". Khi đó, công suất đầu ra là sự kết hợp của ba nguồn công suất đầu vào.

• Tỷ số truyền cố định số 4 (FG4): Chế độ được thực hiện khi phanh 2 khóa MG2 và ly hợp 1 ở trạng thái "Đóng". FG4 kích hoạt trong trường hợp xe đột ngột tăng tốc trong thời gian ngắn.

Phương trình diễn tả tỉ số truyền cố định của bộ hành tinh được viết như sau:

$$k_1 T_{MG1} + k_2 T_{MG2} = -k_e T_e + T_{out} \quad (7)$$

$$\omega_{MG1} = k_1; \omega_{MG1} = k_2; \omega_e = k_3 \quad (8)$$

Trong đó: k_1, k_2, k_e lần lượt là là tỷ số tốc độ thành phần so với đầu ra của MG1, MG2 và động cơ nhiệt (ICE). Các giá trị k_1, k_2, k_e được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Tỷ số truyền cho chế độ FG

TT	k	FG2	FG2	FG3	FG4
1	k_1	$(1+n_3)/n_3$	$(n_3-n_2)/n_3$	1	$1+n_2$
2	k_2	$(1+n_3)/n_3$	$(1+n_3)/n_3$	1	0
3	k_e	$(1+n_3)/n_3$	$(n_1n_2+n_3)/n_3$	1	$1-n_1n_2$

2.3. Chiến lược điều khiển xe hybrid hai chế độ [7]

Chế độ hoạt động được bắt nguồn từ quan điểm của nhu cầu mô men xoắn của bánh xe. Hàm mục tiêu được xác định để tối đa hóa mô men xoắn đầu ra $T_{out}(V, T_e, T_{MG1}, T_{MG2})$ theo ràng buộc của công suất ắc quy. Thuật điều khiển thể hiện theo nguyên tắc sau:

Mục tiêu: Max($T_{out}(V, T_e, T_{MG1}, T_{MG2})$)

Các điều kiện ràng buộc:

$$\begin{cases} P_b < P_{bmax}; 0 \le V \le V_{max}; 0 \le T_e \le T_{emax} \\ -T_{MG1max} \le T_{MG1} \le T_{MG1max}; -T_{MG2max} \le T_{MG2} \le T_{MG2max} \\ 0 \le \omega_e \le \omega_{emax}; -\omega_{MG1max} \le \omega_{MG1} \le \omega_{MG1max}; -\omega_{MG2max} \le \omega_{MG2} \le \omega_{MG2max} \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó: P_b là công suất của ắc quy (kW), V là vận tốc tối ưu của ô tô (km/h), T_e là mô men xoắn của động cơ, T_{MG1}, T_{MG2} là mô men động cơ MG1 và MG2. Hàm mục tiêu được thiết lập để tối ưu hóa đầu ra: Max($T_{out}(V, T_e, T_{MG1}, T_{MG2})$) dưới điều kiện $P_b < P_{b\,max}$. Việc chọn chế độ vận hành cần đảm bảo giảm thiểu mức tiêu thụ nhiên liệu trong khi vẫn đáp ứng được mô men bánh xe theo yêu cầu. Lựa chọn chế độ vận hành xác định thông qua hàm:

Mục tiêu: Min(FC(mode))

Điều kiện ràng buộc:

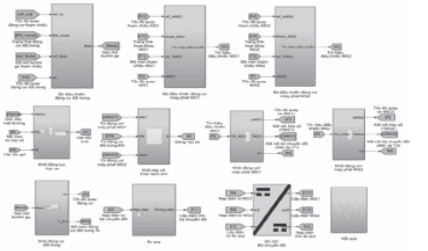
$$T_{out}(mode) \le T_{out\,max}(mode)$$

Trong đó: FC(mode) là mức tiêu thụ nhiên liệu cho chế độ hoạt động nhất định; T_{out}(mode) là mô men xoắn đầu ra tối đa có sẵn của chế độ đã chọn.

3. MÔ PHỎNG

3.1. Sơ đồ mô phỏng xe hybrid sử dụng hộp số hai chế độ

Ứng dụng phần mềm chuyên dụng MATLAB – SIMULINK mô phỏng các khối chức năng, từ đó liên kết các khối để tạo thành một hệ thống hoàn chỉnh. Sơ đồ mô phỏng xe hybrid sử dụng hộp số hai chế độ được thể hiện trên Hình 2. Sơ đồ mô phỏng gồm các khối chính sau: Khối bộ điều khiển các chế độ hoạt động của xe; Khối bộ điều khiển động cơ nhiệt (ICE); Khối bộ điều khiển motor điện; Khối motor điện; Khối động cơ nhiệt; Khối động lực học xe; Khối hộp số; Khối ắc quy; Khối bộ chuyển đổi [8], [9].



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng các hệ thống xe hybrid sử dụng hộp số hai chế độ

3.2. Khảo sát và đánh giá kết quả

Thông số mô phỏng:

Tiến hành mô phỏng xe hybrid sử dụng hộp số hai chế độ với các giá trị thông số của hệ thống được thể hiện trong Bảng 3.

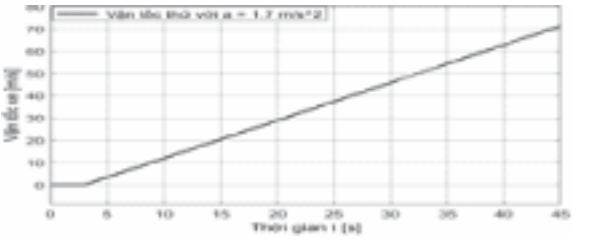
Bảng 3. Giá trị thông số xe mô phỏng [10].

Thông số xe				**Thông số động cơ (ICE)**			
TT	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	TT	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	G	2680	kg	6	$P_{e\ max}$	248	kw
2	a	1.4	m	7	$n_{pe\ max}$	5100	v/p
3	L	1.6	m	8	$n_{mem\ ax}$	4100	Ns/m
4	h_g	0.5	m	9	$T_{e\ max}$	498	N.m
5	r_{bx}	0.4	m	10	$n_{e\ max}$	6000	v/p
Động cơ/máy phát MG1, MG2				**Thông số ắc quy**			
TT	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	TT	Ký hiệu		
11	$P_{MG\ max}$	60	kw	14	Loại: Ni - MH		
12	T_{MG}	300	N.m	15	$P_{aq\ max}$	40	kW
13	n_{MG}	9000	v/p	16	V_{max}	300	Vôn

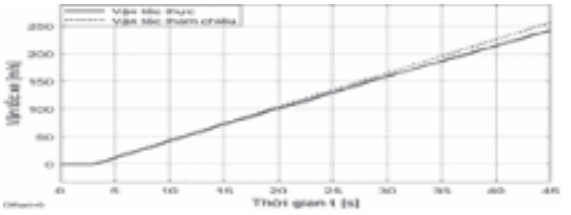
Trong đó: G là trọng lượng ô tô; a là khoảng cạnh từ trọng tâm đến cầu trước; L là chiều dài cơ sở xe; h_g là chiều cao trọng tâm xe; r_{bx} là bán kính bánh xe; $P_{e,max}$ là công suất cực đại của động cơ; $n_{pe\ max}$ là tốc độ vòng quay lớn nhất ứng với công suất cực đại; $T_{e\ max}$ là mô men lớn nhất của động cơ; $n_{mem\ ax}$ là tốc độ vòng quay ứng với mô men lớn nhất; $n_{e\ max}$ là tốc độ vòng quay lớn nhất của động cơ; P_{MG} max, T_{MG} max, $n_{MG\ max}$ lần lượt là công suất, mô men, tốc độ cực đại của MG1, MG2; $P_{aq\ max}$, V_{max} là công suất, điện áp lớn nhất của ắc quy.

Quá trình tiến hành mô phỏng thực hiện qua phương án khảo sát sau:

Thực hiện mô phỏng hệ thống động lực ô tô hybrid kiểu hai chế độ trên mô hình mô phỏng đã xây dựng trong trường hợp xe tăng tốc từ giây thứ 3 và giữ nguyên gia tốc không đổi a = 1.7 m/s² cho đến hết thời gian 45s. Quá trình mô phỏng thu được một số kết quả cụ thể như sau đây.

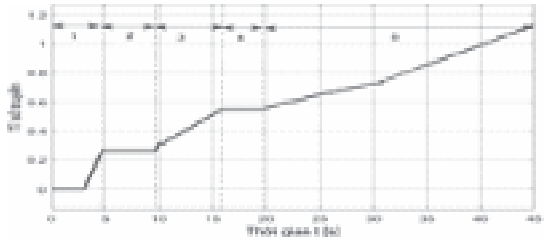


Hình 3. Đường biểu diễn giá trị vận tốc thử với gia tốc a = 1.7 m/s²

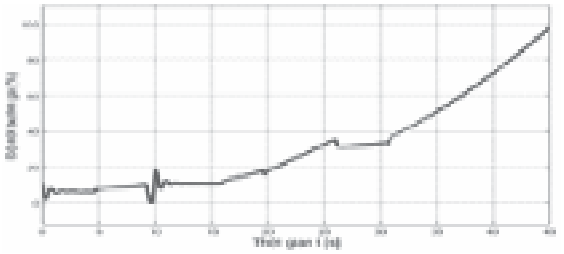


Hình 4. Đường biểu diễn giá trị vận tốc thực và vận tốc tham chiếu

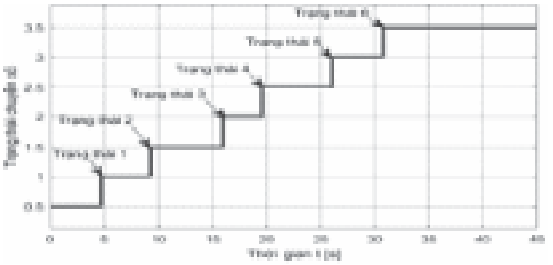
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



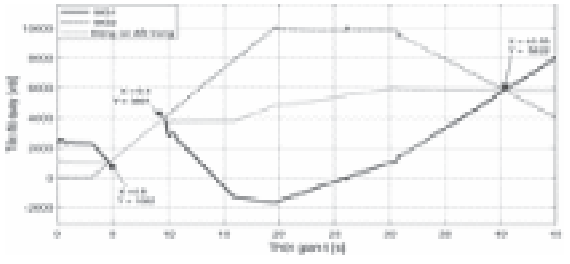
Hình 5. Đường biểu diễn giá trị tỉ số truyền



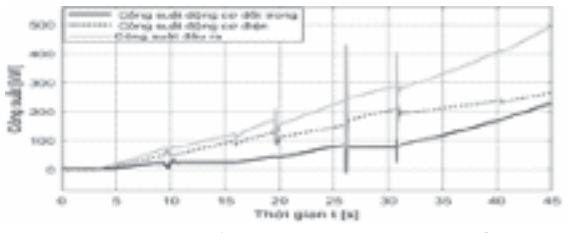
Hình 6. Đường biểu diễn giá trị độ mở bướm ga



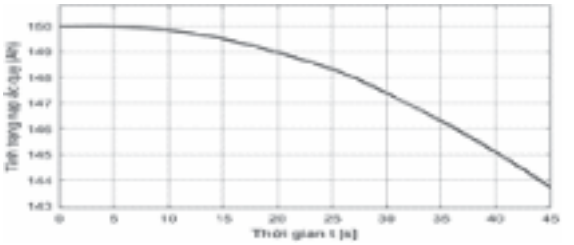
Hình 7. Đường biểu diễn giá trị trạng thái chuyển số



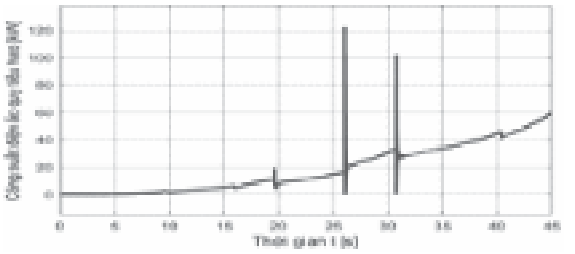
Hình 8. Đường biểu diễn giá trị tốc độ quay MG1, MG2, ICE



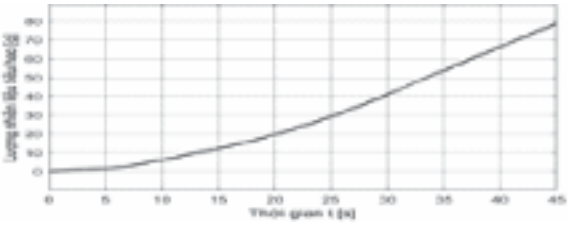
Hình 9. Đường biểu diễn giá trị công suất điện, động cơ đốt trong, công suất tổng



Hình 10. Đường biểu diễn giá trị điện nạp ắc quy (pin)



Hình 11. Đường biểu diễn giá trị công suất tiêu hao của ắc quy (pin)



Hình 12. Đường biểu diễn giá trị lượng nhiên liệu tiêu hao

Trên Hình 4 diễn tả kết quả mô phỏng vận tốc xe, phân tích kết quả cho thấy hệ thống đáp ứng tốt với yêu cầu chuyển động, ở các giá trị vận tốc nhỏ hơn 100 km/h vận tốc thực của xe gần như trùng với vận tốc tham chiếu, giá trị vận tốc thực của xe chỉ có sự chênh lệch tương đối nhỏ so với vận tốc tham chiếu khi vận tốc xe đạt đến giá trị 103 km/h. Trên Hình 5 diễn tả kết quả tính toán tỉ số truyền của hệ thống truyền lực (tốc độ động cơ đốt trong /tốc độ bán trục). Phân tích kết quả cho thấy ứng với 6 giai đoạn chuyển số Hình 7 thì tỉ số truyền có sự thay đổi khác nhau, trong đó: có 2 giai đoạn tỉ số truyền cố định là giai đoạn 1 (4.72s - 9.46s) và 2 (15.82s - 19.66s); 4 giai đoạn tỷ số truyền thay đổi ứng với chế độ chia công suất ☞

đó là chế độ bắt đầu chia công suất, chia công suất đầu vào và chia công suất hỗn hợp. Trên Hình 6 diễn tả kết quả mô phỏng giá trị độ mở bướm ga. Phân tích kết quả cho thấy ban đầu độ mở bướm ga tương đối nhỏ khoảng 11°, sau đó tăng lên 19° trong khoảng thời gian (9.46s - 11s), và ổn định khoảng 11° trong khoảng (11s - 17s) và tăng mạnh trở lại lên giá trị cực đại xấp xỉ 100° độ tại 45s. Trên Hình 7 diễn tả kết quả mô phỏng trạng thái chuyển số. Từ đồ thị cho thấy có 6 giai đoạn chuyển số ứng với các chế độ: 1) Chế độ bắt đầu làm việc ứng với (0s - 4,72s); 2) Chế độ tỉ số truyền cố định (4,72s - 9.46s); 3) Chế độ chia công suất đầu vào (9.46s -15.82s); 4) Chế độ tỉ số truyền cố định (15.82s - 19.66s); 5) Chế độ chia công suất hỗn hợp (19.66s - 32.26s); 6) Trạng thái chia công suất hỗn hợp (32.26 - 45s). Trên Hình 8 diễn tả kết quả mô phỏng tốc độ của các trục động cơ đốt trong, trục các tổ hợp động cơ/máy phát MG1, MG2. Kết quả cho thấy giá trị các tốc độ có sự thay đổi tương ứng với các thời điểm chuyển chế độ làm việc tại: 4.8s; 9.4s; 19.7s; 30.2s và 40.15s. Trên Hình 9 diễn tả kết quả mô phỏng công suất điện, động cơ đốt trong, công suất tổng đầu ra. Phân tích kết quả cho thấy giá trị công suất thay đổi mạnh tại thời điểm 3.5s và tăng tuyến tính trong giai đoạn tiếp theo. Giá trị công suất điện đạt 265.41 kW, công suất động cơ đốt trong đạt 230.4 kW, công suất tổng cộng 494.45 kW tại 35s. Trên đồ thị có những điểm nhiễu tăng giảm đột biến tương ứng với các giai đoạn chuyển số. Trên Hình 10 diễn tả kết quả mô phỏng mức tiêu thụ điện năng của pin theo (Ah) ampe giờ. Công suất tối đa là 150 Ah và tối thiểu là 143 Ah. Có thể quan sát thấy mức giảm 6.18 Ah. Điều này cho thấy pin được sử dụng ngay từ thời điểm ban đầu. Dung lượng nạp pin tại thời điểm gia tốc có giá trị 150 Ah sau đó giảm dần theo đường bậc 2 xuống còn 143.82 Ah trong khoảng 45s. Trên Hình 11 diễn tả kết quả mô phỏng giá trị công suất điện tiêu hao của pin. Tổn thất pin tối đa được quan sát thấy lên đến khoảng 57.56 kW sau 45s thực hiện. Một số đột biến tổn thất pin lên đến 122.14 kW. Các đột biến trong biểu đồ tổn thất là khi thay đổi chế độ hoạt động. Trên Hình 12 diễn tả kết quả mô phỏng giá trị lượng nhiên liệu tiêu hao trong quá trình làm việc. Mức tiêu thụ nhiên liệu tối đa được quan sát thấy lên đến khoảng 79.3 gam. Lượng nhiên liệu liên tục tăng theo đường cong tuyến tính và đạt giá trị lớn nhất 79.3 gam tại thời điểm 45s.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu và mô phỏng quá trình làm việc xe hybrid sử dụng hộp số kiểu hai chế độ, từ đó phân tích và đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến tính kinh tế nhiên liệu theo điều kiện vận hành như: trạng thái chuyển số, tỉ số truyền lực, quá trình phân chia công suất, tốc độ các trục đầu vào đầu ra, công suất tiêu hao pin, trạng thái nạp pin, lượng tiêu hao nhiên liệu.

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống truyền lực sử dụng hộp số kiểu hai chế độ phù hợp với các xe hybrid có công suất lớn và có hiệu suất truyền động tốt nhất khi xe chạy tốc độ cao hoặc tăng tốc. Hiệu suất truyền động của xe phụ thuộc vào tốc độ, mô men xoắn đầu vào và tỷ số tốc độ. Trong đó, tỷ số tốc độ là yếu tố quyết định nhất.

Bài báo đã xây dựng được cơ sở lý thuyết hệ thống truyền lực xe hybrid với hộp số kiểu hai chế độ sử dụng bộ hành tinh để phối hợp các nguồn công suất. Kết quả nghiên cứu có thể làm tài liệu tham khảo trong thiết kế ô tô hybrid mới, cải tiến ô tô truyền thống thành ô tô hybrid.❖

Ngày nhận bài: **03/4/2025**
Ngày phản biện: **25/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Lê Anh Tuấn, et al. (2017), "*Nhiên liệu thay thế dùng cho động cơ đốt trong*". NXB. Bách Khoa Hà Nội, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

[2]. Phạm Minh Tuấn (2012), "*Khí thải động cơ và ô nhiễm môi trường*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.

[3]. Mikhail Granovskii, et al. (2006), "*Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles*". Journal of Power Sources. Vol.159, pp.1186-1193.

[4]. Ho, T.-T.; Hwang, S.-J. (2019), "*Configuration synthesis of two-mode hybrid transmission systems with nine-link mechanisms*". Mech. Mach. Theory, 142, 103615.

[5]. Hwang, Hsiu-Ying. (2020), "*Developing Equivalent Consumption Minimization Strategy for Advanced Hybrid System-II Electric Vehicles*". Energies, 13(8), 2033.

[6]. A. Du and H. Cai. (2011), "*An analytic foundation for the Two-mode hybrid transmission with a comparison to other hybrid vehicle power split transmissions*". Proc. Int. Conf. Transp. Mech. Electr. Eng. TMEE 2011, pp. 803-808.

[7]. Jeongmin Kim, et al. (2011), "*Mode Control Strategy for a Two-Mode Hybrid Electric Vehicle Using Electrically Variable Transmission (EVT) and Fixed-Gear Mode*". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60(3), 793-803.

[8]. Khổng Văn Nguyên, Trần Văn Thoan, Đồng Minh Tuấn, Lê Anh Vũ (2022), "*Ứng dụng máy tính trong thiết kế và tính toán ô tô*". NXB. Khoa học và Kỹ Thuật.

[9]. Http://www.mathworks.com/products/stateflow/ truy cập ngày 18/04/2025.

[10]. W. Zhuang, X. Zhang, D. Zhao, H. Peng, L.Wang (2016), "*Optimal design of three-planetary-gear power-split hybrid powertrains*". Int. J. Automot. Technol., vol. 17, no. 2, pp. 299-309.

NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA VỊ TRÍ ĐẦM DÙI VÀ TỈ SỐ NÉN CỦA KHUÔN ĐẾN CHẤT LƯỢNG BÓ VỈA BÊTÔNG TRONG MÁY ĐÚC BÓ VỈA HÈ SỬ DỤNG ĐẦM DÙI ĐỂ TẠO RUNG ĐỘNG

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE POSITION OF THE POKER VIBRATOR AND THE COMPRESSION RATIO OF THE MOLD ON THE QUALITY OF THE CONCRETE CURB IN THE SLIPFORM CURB MACHINE USING THE POKER VIBRATOR TO CREATE VIBRATION

Lương Văn Tới*, Huỳnh Công Lớn
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh
**Email: luongtoitt@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Bó vỉa hè, nơi tiếp giáp giữa mặt đường và vỉa hè được chế tạo bằng nhiều phương pháp khác nhau. Trong đó, phương pháp đúc tại chỗ liên tục kết hợp với rung động là một phương pháp tiên tiến, cho năng suất cao hơn so với các phương pháp khác. Tuy nhiên, máy đúc bó vỉa hè loại này có nhiều thông số ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bó vỉa sau khi đúc cần được xác định hợp lý và tối ưu. Trong bài báo này, một mô hình máy đúc bó vỉa hè sử dụng nguyên lý đúc liên tục tại chỗ với sự rung động tạo ra từ đầm dùi được chế tạo và thực nghiệm nhằm tìm ra thông số hợp lý của vị trí đặt đầm dùi tạo rung và tỉ số nén của khuôn tạo hình bó vỉa bê tông.

Từ khóa: *Máy đúc bó vỉa hè; Bó vỉa hè cốp pha trượt; Máy tạo bó vỉa hè tại chỗ.*

ABSTRACT

The curb, which is the interface between the roadway and the sidewalk, is constructed using various methods. Among them, the continuous in-situ making method combined with vibration is an advanced technique that offers higher productivity compared to other methods. However, concrete curb machines of this type have many parameters that directly affect the quality of the curb after casting, and these parameters need to be reasonably determined and optimized. In this paper, a concrete curb machine model utilizing the principle of continuous in-situ casting with vibration generated by poker vibrator was developed and tested to determine the optimal parameters for the vibrator positioning and the compression ratio of the curb shaping mold.

Keywords: *Pavement molding machine; Slipform curb machine; Concrete curb paver; Curb maker.*

1. TỔNG QUAN

Hiện nay, việc đáp ứng cơ sở hạ tầng cho sự phát triển của nền kinh tế Việt Nam là rất cấp thiết. Toàn bộ chi phí cho xây dựng đường lưu thông là rất lớn. Trong chi phí xây dựng đường thì chi phí làm vỉa hè cũng đòi hỏi một chi phí không nhỏ. Hiện tại, việc xây bó vỉa hè vẫn thực hiện chủ yếu bằng thủ công do công nhân thực hiện. Một số ít trường hợp thì bó vỉa hè được chế tạo sẵn tại nhà máy với chiều dài khoảng nhất định, sau đó đưa đến công trình và đặt xuống từng thanh một. Tất cả cách làm này rất chậm, làm giảm tốc độ dự án, gây tăng giá thành con đường, giảm khả năng cạnh tranh. Để tăng năng suất, giảm chi phí công nhân thì cần sử dụng loại máy đúc bó vỉa hè liên tục tại chỗ. Loại máy này được nghiên cứu và sử dụng phổ biến ở một số nước trên thế giới. Tuy nhiên, ở Việt Nam vẫn còn hạn chế trong việc nghiên cứu và ứng dụng loại máy này vì chi phí đầu tư ban đầu tương đối cao và có nhiều thông số của máy ảnh hưởng đến chất lượng bó vỉa cần được nghiên cứu để phù hợp với đặc tính địa hình con đường ở Việt Nam. Trong bài báo này, phương pháp thực nghiệm được sử dụng để tìm ra hai thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến chất lượng của bó vỉa hè là vị trí đặt đầm dùi tạo rung và tỉ số nén của khuôn tạo hình bó vỉa dựa trên một mô hình máy thật được chế tạo sử dụng nguyên lý đúc liên tục tại chỗ và kết hợp sự rung động.

2. CÁC PHƯƠNG PHÁP TẠO BÓ VỈA HÈ

Hiện nay, có hai phương pháp thi công bó vỉa hè: Phương pháp đúc sẵn và phương pháp đúc tại chỗ.

2.1. Phương pháp đúc sẵn

Phương pháp đúc sẵn (hình 1) là các đoạn bó vỉa hè được đúc thành các đoạn mô-đun có kích thước và hình dạng giống nhau, việc đúc các đoạn bó vỉa hè này được thực hiện tại xưởng và sau đó vận chuyển chúng đến công trình thi công để công nhân lắp chúng xuống mặt đường, kết nối lại với nhau bằng xi măng. Ngoài ra, trong phương pháp đúc sẵn thì bó vỉa hè còn được làm bằng đá và được cắt sẵn tại nhà máy. Sau đó, đá bó vỉa hè được vận chuyển đến công trình thi công, chúng được đặt vào đúng vị trí và được nối lại với nhau.



Hình 1. Phương pháp đúc sẵn

Ưu điểm: Các đoạn bó vỉa hè được đúc tại xưởng nên thực hiện dễ dàng; Chi phí đầu tư ban đầu (máy móc, thiết bị) không cao; Dễ dàng chừa khe hở nhiệt giữa các đoạn bó vỉa hè (công việc này thực hiện dễ dàng khi công nhân lắp đặt các đoạn bó vỉa hè xuống mặt đường).

Nhược điểm: Dễ bị hư hỏng khi vận chuyển các đoạn bó vỉa hè từ nơi đúc đến công trình thi công; Việc lắp đặt các đoạn bó vỉa hè đã được đúc sẵn xuống mặt đường được thực hiện bằng tay nên năng suất không cao và dễ bị vỡ; Chất lượng phụ thuộc vào trình độ tay nghề của công nhân; Khó thực hiện trên các đoạn đường có nhiều góc cua nhỏ vì phải sử dụng các đoạn bó vỉa hè đúc sẵn có chiều dài ngắn để có thể kết nối lại thành góc cua; Chất lượng có thể không đồng đều giữa các vị trí nối các đoạn bó vỉa hè với nhau. ☞

2.2. Phương pháp đúc tại chỗ

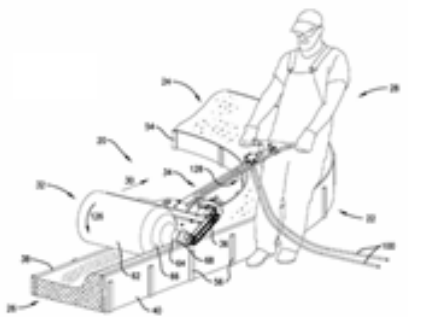
Phương pháp đúc tại chỗ là bó vỉa hè được đúc ra tại nơi thi công nhờ vào một tổ hợp các máy móc thiết bị (máy trộn bêtông, băng tải, vít tải liệu, máy đúc bó vỉa hè,...). Có ba cách thường sử dụng trong phương pháp đúc tại chỗ để tạo ra bó vỉa hè là:

2.2.1. Phương pháp đúc tại chỗ định hình bằng khuôn cốp pha cố định

Đối với bó vỉa hè có hình dạng mặt cắt ngang đơn giản (hình chữ nhật, hình thang) thì tại nơi cần lắp đặt bó vỉa hè sẽ hình thành các khuôn cốp pha, sau đó bê tông sẽ được trộn và đổ vào khuôn cốp pha, sau khi bê tông đã đông cứng thì tiến hành tháo khuôn cốp pha ra và bó vỉa hè được hình thành đúng với biên dạng của khuôn. Cách thi công này đơn giản, dễ thực hiện, ít tốn kém chi phí đầu tư máy và thiết bị ban đầu, tuy nhiên vì làm thủ công nên năng suất không cao, chất lượng không đồng đều và rất dễ làm hỏng bề mặt bó vỉa hè khi tháo khuôn.

2.2.2. Phương pháp đúc tại chỗ định hình bằng khuôn cốp pha và trống lăn

Đối với các loại bó vỉa hè có hình dạng mặt cắt ngang tương đối phức tạp (có bậc, cung lượn tròn,...) thì thường sử dụng phương pháp định hình bằng khuôn cốp pha và trống lăn (hình 2). Bê tông được đổ vào khuôn cốp pha, hình dạng hai bên hông của bó vỉa được đình hình theo khuôn cốp pha, bề mặt phía trên được định hình theo hình dạng của trống lăn. Phương pháp này tạo ra được bề mặt bó vỉa hè đẹp, đạt được độ nhẵn bóng, tuy nhiên việc thực hiện vẫn còn thực hiện bằng tay nên năng suất không cao.



Hình 2. Phương pháp đúc tại chỗ định hình bằng khuôn cốp pha và trống lăn

2.2.3. Phương pháp đúc tại chỗ định hình bằng khuôn cốp pha trượt

Đối với các máy đúc bó vỉa hè tại chỗ liên tục và được đình hình bằng khuôn cốp pha trượt thì bê tông được trộn và đổ vào phễu chứa liệu của máy bó vỉa hè, đầu ra của máy có khuôn định hình, sau khi vật liệu ra khỏi khuôn thì tạo thành bó vỉa hè có hình dạng như mong muốn.



Hình 3. Phương pháp đúc tại chỗ liên tục và được định hình bằng khuôn cốp pha trượt

Ưu điểm: Năng suất rất cao; Không phải tốn thời gian và chi phí vận chuyển như phương pháp đúc sẵn; Dễ dàng tạo ra nhiều kiểu (dạng) bó vỉa hè khác nhau bằng cách thay đổi hình dạng của khuôn ra; Có thể đúc ra các dạng cung tròn, góc cua,....

Nhược điểm: Chi phí đầu tư cho máy móc, thiết bị ban đầu cao; Việc vận hành máy không tốt sẽ làm ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm ra, làm cho sản phẩm ra không đồng đều;

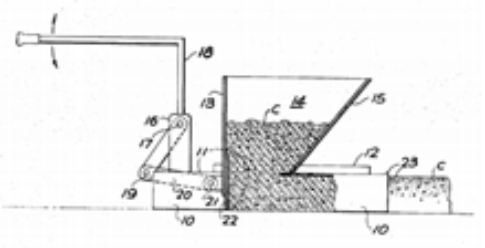
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Khó khăn trong việc tạo khe hở nhiệt cho bó vỉa hè; Việc tạo khe hở nhiệt được thực hiện thành một công đoạn riêng sau khi bó vỉa hè đã được đúc liên tục, đối với các bó vỉa hè có kích thước mặt cắt ngang lớn thì việc cắt khe hở nhiệt thực hiện rất khó khăn.

Trong phương pháp đúc tại chỗ liên tục và được định hình bằng khuôn cốp pha trượt, các máy đúc bó vỉa hè làm việc chủ yếu dựa trên ba nguyên lý:

2.2.3.1. Máy đúc bó vỉa hè hoạt động theo nguyên tắc tay quay con trượt (hoặc cơ cấu bốn khâu bản lề)

Máy bó vỉa hè hoạt động theo nguyên tắc tay quay con trượt (hình 4) có tấm đẩy chuyển động song phẳng: chuyển động theo phương ngang sẽ có tác dụng ép vật liệu về phía trước khuôn, chuyển động theo phương thẳng đứng có tác dụng hất vật liệu lên trên để xới vật liệu, làm cho vật liệu không tạo vòm trên phễu. Vật liệu sau khi đi ra khỏi khuôn sẽ được định hình theo hình dạng của khuôn, nhờ lực ma sát giữa vật liệu và mặt đường lớn hơn lực cản di chuyển gây ra do trọng lượng bản thân của máy nên tạo ra phản lực đẩy máy chuyển động lùi về phía sau.



Hình 4. Máy bó vỉa hè hoạt động theo nguyên tắc tay quay con trượt

Ưu điểm: Tự di chuyển, không cần bộ phận kéo để di chuyển; Kết cấu đơn giản; Kích thước nhỏ gọn.

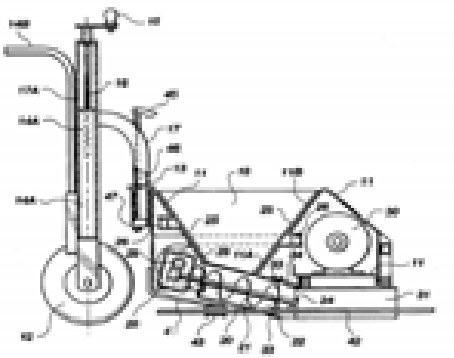
Nhược điểm: Năng suất thấp; Máy tự di chuyển nên khó di chuyển thẳng, rất dễ bi cong vẹo; Khó tạo ra bó vỉa hè có dạng cung tròn hoặc có nhiều khúc cua.

2.2.3.2. Máy đúc bó vỉa hè hoạt động theo nguyên tắc ép đùn trục vít

Hình 5 là kết cấu của một loại máy bó vỉa hè sử dụng vít đùn để tạo ra lực nén chặt vật liệu. Vật liệu được cung cấp từ phễu chứa liệu, tại đây vật liệu rơi xuống và được ép chặt nhờ vít đùn, khi vật liệu được nén chặt và tiếp xúc với mặt đường sẽ sinh ra phản lực đẩy máy chuyển động về phía sau nhờ lực ma sát giữa vật liệu và mặt đường thắng được lực cản di chuyển do trọng lượng bản thân của toàn bộ máy gây ra.

Ưu điểm: Kết cấu đơn giản; Máy có khả năng tự di chuyển không cần phải có bộ phận dẫn động di chuyển riêng; Vật liệu được nén chặt tốt; Việc nén chặt vật liệu không phụ thuộc vào tốc độ cấp liệu đầu vào.

Nhược điểm: Năng suất thấp do tốc độ di chuyển phụ thuộc vào việc nén chặt vật liệu; Rất dễ di chuyển cong vẹo, khó di chuyển theo đường thẳng; Rất khó tạo ra bó vỉa hè có dạng cung tròn và có nhiều khúc cua.



Hình 5. Máy đúc bó vỉa hè hoạt động theo nguyên tắc ép đùn trục vít

2.2.3.3. Máy đúc bó vỉa hè cốp pha trượt dựa trên nguyên lý rung

Máy bó vỉa hè sử dụng nguyên lý rung để làm chặt vật liệu được thể hiện trên hình 6. Vật liệu sẽ được đổ vào phễu chứa liệu, trong phễu có lắp đầm dùi tạo rung, dưới tác dụng rung của đầm dùi và cùng với trọng lượng bản thân của vật liệu thì vật liệu sẽ được nén chặt. Hình dạng của bó vỉa hè được định hình bằng khuôn cốp pha trượt. Sự di chuyển của máy sẽ được dẫn động bằng máy kéo (bộ phận dẫn động) riêng biệt, máy loại này không có khả năng tự hành. Năng suất của máy rất cao. Đặc biệt, đối với mặt đường nhấp nhô không bằng phẳng, máy sẽ tự điều chỉnh độ cao để đảm bảo bó vỉa hè được tạo ra gần như nằm ngang tuyệt đối. Máy có khả năng thích ứng cao đối với các bó vỉa hè có dạng hình tròn hay có nhiều khúc cua quẹo. Hiện nay, loại máy này được sử dụng rất phổ biến trên thế giới.



Hình 6. Máy bó vỉa hè cốp pha trượt sử dụng phương pháp rung

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

3.1. Mô hình máy bó vỉa hè

Với những sự phân tích ở trên, bài báo này sẽ tiến hành nghiên cứu mô hình máy đúc bó vỉa hè cốp pha trượt sử dụng nguyên lý rung nhằm tìm ra các thông số phù hợp để máy có thể đáp ứng được các yêu cầu sau:

- Máy làm việc phù hợp với môi trường Việt Nam;

- Máy có khả năng tạo ra nhiều biên dạng bó vỉa hè khác nhau (hình 8);

- Máy có khả năng chạy tự động theo đường dây chuẩn được gióng sẵn, máy tự điều chỉnh hướng chạy và điều chỉnh độ cao khi vào các khúc cua và khi mặt đường mấp mô không bằng phẳng.



Hình 7. Các dạng khác nhau của bó vỉa hè

Máy đúc bó vỉa hè cốp pha trượt được thiết kế và chế tạo để tiến hành thực nghiệm có kết cấu như hình 8. Máy sử dụng nguyên lý đúc liên tục cốp pha trượt tại chỗ với việc tạo rung bằng đầm dùi. Thông số máy được chế tạo như sau:

- Kích thước bao (dài x rộng x cao): 2240 x 1900 x 1570 mm;

- Vận tốc di chuyển của máy khi làm việc: 180 (m/giờ);

- Năng suất máy: Tương ứng với tốc độ làm việc của máy 0.18 km/giờ;

- Máy có khả năng tự động điều chỉnh hướng chạy và cao độ theo đường dây chuẩn được gióng trước để đảm bảo rằng máy có thể tạo ra những đoạn bó vỉa hè có hình dạng thẳng hoặc cong (góc cua) và bó vỉa hè luôn nằm ngang trong khi mặt đường chạy có thể mấp mô, cao, thấp khác nhau;

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

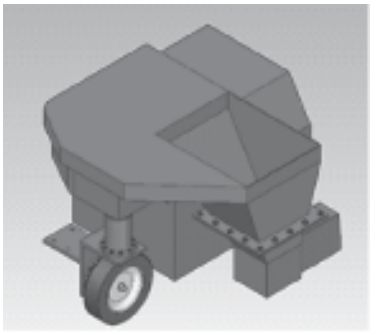
- Máy được thiết kế có thể tạo ra nhiều hình dạng bó vỉa hè khác nhau, việc này được thực hiện bằng cách thay khuôn có hình dạng tương ứng với hình dạng của bó vỉa hè cần tạo ra. Kích thước khuôn lớn nhất có kích thước 450 x 450 mm;

- Cơ cấu di chuyển xe: Dùng động cơ điện xoay chiều với khả năng di chuyển tiến, lùi;

- Cơ cấu lái bánh xe chủ động: Dùng động cơ điện xoay chiều với khả năng lái được hai phương trái, phải;

- Cơ cấu nâng hạ khuôn để đảm bảo bó vỉa hè luôn nằm ngang: Sử dụng động cơ điện xoay chiều, tốc độ nâng/hạ là 0.9 (m/phút);

- Đầm dùi: Sử dụng loại đầm dùi cầm tay động cơ điện đường kính đầu dùi là 36mm, chiều dài 350mm.



a) Mô hình máy được thiết kế trên máy tính



b) Mô hình máy sau khi được chế tạo

Hình 8. Mô hình máy được chế tạo để thực nghiệm

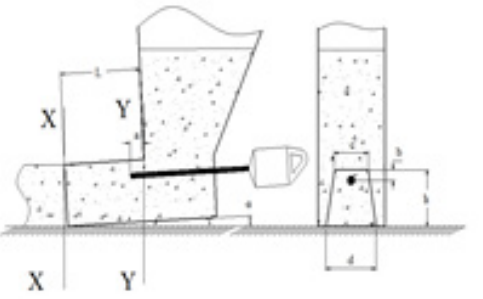
3.2. Các thông số cần thực nghiệm

Có rất nhiều thông số ảnh hưởng đến chất lượng của bó vỉa hè được tạo ra như: Tần số rung của đầm dùi, vị trí đặt đầm dùi, góc nghiêng khuôn, tốc độ di chuyển máy, yếu tố con người, điều kiện môi trường,…

Có nhiều chỉ tiêu đánh giá chất lượng bó vỉa hè được tạo ra như: Độ cứng, độ nhẵn bóng bề mặt,…

Tuy nhiên, trong bài báo này chỉ giới hạn việc khảo sát bằng thực nghiệm trên hai yếu tố quan trọng đầu vào là vị trí đặt đầm dùi và góc nghiêng khuôn, và sử dụng chỉ tiêu độ cứng làm hàm mục tiêu để đánh giá chất lượng của bó vỉa hè được tạo ra.

Khái niệm "Góc nghiêng khuôn" là góc nghiêng giữa khuôn và mặt đường nằm ngang. Khái niệm này chỉ mang tính chất cục bộ cho từng khuôn cụ thể, nếu hai khuôn có cùng góc nghiêng khuôn nhưng có chiều dài khuôn khác nhau thì tính chất sẽ khác nhau vì thể tích bê tông vào khuôn và ra khỏi khuôn sẽ khác nhau. Vì vậy, khái niệm góc nghiêng khuôn được thay thế bằng khái niệm "Tỉ số nén khuôn" sẽ phù hợp hơn. Tỉ số nén khuôn là tỉ số giữa diện tích mặt cắt ngang của khuôn khi bê tông vào khuôn và diện tích mặt cắt ngang của khuôn khi bê tông ra khỏi khuôn.



Hình 9. Sơ đồ bố trí đầm dùi và tỉ số nén khuôn

Trên hình 9, tỉ số nén khuôn được tính bằng diện tích mặt cắt Y-Y chia cho diện tích mặt cắt X-X.

Tỉ số nén khuôn (i_k) được xác định theo công thức sau:

$$i_k = \frac{S_{YY}}{S_{XX}} \quad (1)$$

Trong đó: S_{YY} – Diện tích mặt cắt ngang của khuôn tại Y-Y; S_{XX} – Diện tích mặt cắt ngang của khuôn tại X-X.

Diện tích S_{XX} được tính theo công thức:

$$S_{XX} = \frac{1}{2}(c + d)h \quad (2)$$

Diện tích S_{XX} được tính theo công thức:

$$S_{XX} = \frac{1}{2}(c + d)(h + L.\sin\alpha) \quad (3)$$

Vậy:

$$i_k = \frac{S_{YY}}{S_{XX}} = \frac{h+L.\sin\alpha}{h} = 1 + \frac{L}{h}\sin\alpha \quad (4)$$

Với khuôn đã được thiết kế có các thông số sau:

c = 200mm;
d = 250mm;
h = 320mm;
L = 490mm.

Góc nghiêng α sẽ được điều chỉnh khác nhau để tạo ra các tỉ số nén khuôn khác nhau trong quá trình thử nghiệm. Việc thay đổi góc nghiêng khuôn được thực hiện một cách dễ dàng vì máy được thiết kế có bộ phận thay đổi được chiều cao của bánh xe dẫn động phía trước.

Các thông số còn lại được chọn như sau:

- Tần số rung của đầm dùi: 7500 v/ph;
- Đường kính đầm dùi: d = 36mm;
- Vị trí đặt đầm dùi: Theo chiều cao của khuôn (hình 9), b = 50 mm;
- Bê tông được tiến hành thí nghiệm là bê tông có mác 200.

4. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

Ta có 02 thông số được xem là thông số đầu vào của bài toán quy hoạch thực nghiệm cần được thực nghiệm là vị trí đầm dùi theo chiều dọc của máy (a) và tỉ số nén khuôn (i_k). Mỗi thông số sẽ được tiến hành thử nghiệm ở 04 giá trị khác nhau, Như vậy, tổ hợp của các giá trị này sẽ có tổng cộng 16 mẫu thí nghiệm ứng với 16 trường hợp khác nhau. Mẫu bó vỉa hè sau khi đúc ra được kiểm tra độ cứng (hàm mục tiêu của bài toán quy hoạch thực nghiệm) và cho kết quả ở bảng 1. Các giá trị của a > 0 khi đầm dùi nằm trong khuôn (đầm dùi được đút sau vào bên trong khuôn), a = 0 khi đầu đầm dùi nằm tại mép khuôn, a < 0 khi đầm dùi nằm ngoài khuôn (không đút vào bên trong khuôn).

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm

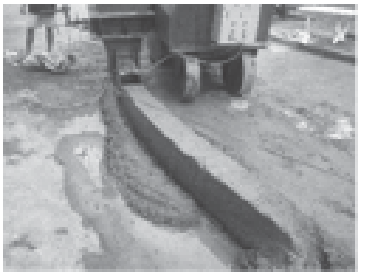
Tên mẫu	Vị trí đầm dùi theo phương dọc của máy (Khoảng cách a)	Tỉ số nén khuôn (i_k)	Độ cứng (kg/cm²)
Mẫu 01	-20	1	60
Mẫu 02		1.1	100
Mẫu 03		1.2	150
Mẫu 04		1.3	0
Mẫu 05	0	1	70
Mẫu 06		1.1	130
Mẫu 07		1.2	180
Mẫu 08		1.3	0

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Mẫu 09	30	1	100
Mẫu 10		1.1	160
Mẫu 11		1.2	200
Mẫu 12		1.3	0
Mẫu 13	70	1	0
Mẫu 14		1.1	0
Mẫu 15		1.2	0
Mẫu 16		1.3	0

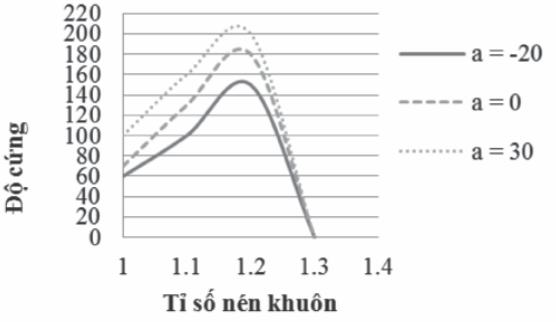
Trong bảng 1 có các mẫu có độ cứng bằng 0, điều này có nghĩa là trong các trường hợp đó bó vỉa hè không được hình thành vì bê tông không điền đầy khuôn hoặc bị đổ vụn khi tạo ra.

Công việc thực nghiệm được thể hiện ở hình 10.

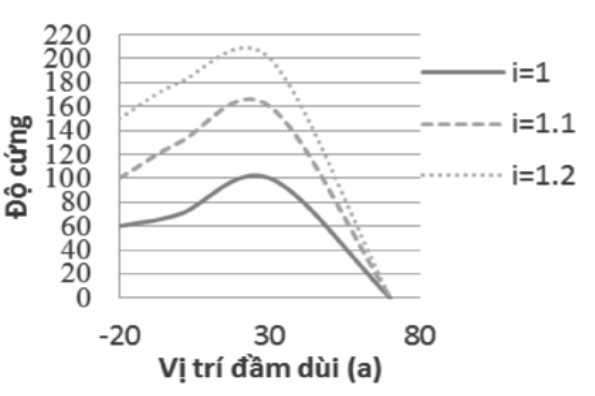


Hình 10. Hình ảnh thực nghiệm

Dựa vào bảng kết quả thực nghiệm (bảng 1), ta vẽ được đồ thị thể hiện mối tương quan giữa tỉ số nén khuôn (i_k), vị trí đầm dùi (a) với độ cứng bê tông trên hình 11a và 11b.



a)



b)

Hình 11. Quan hệ giữa độ cứng và vị trí đầm dùi, tỉ số nén khuôn

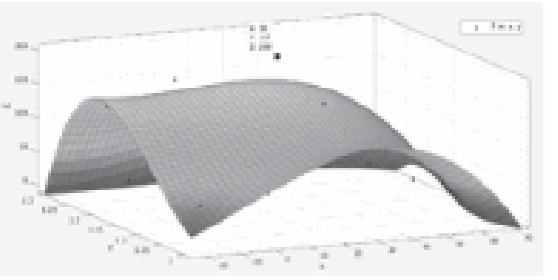
Sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất để tìm mối quan hệ giữa độ cứng và tỉ số nén khuôn, vị trí đầm dùi.

- Gọi biến x_1 là vị trí đầm dùi (a);
- Gọi biến x_2 là tỉ số nén khuôn (i_k);
- Gọi y là hàm mục tiêu (độ cứng).

Ta tìm được phương trình thể hiện mối quan hệ:

$$y = 33840 + 74.61x_1 - 94740x_2 - 0.1x_1^2 - 125.7x_1x_2 + 88060x_2^2 + 0.08\ x_1^2x_2 + 53.26\ x_1x_2^2 - 27080\ x_2^3$$

Đồ thị thể hiện quan hệ giữa độ cứng và vị trí đầm dùi, tỉ số nén khuôn biểu diễn trong không gian được thể hiện trên hình 12.



Hình 12. Quan hệ giữa độ cứng và vị trí đầm dùi, tỉ số nén khuôn biểu diễn trong không gian

5. KẾT LUẬN

Thông qua bài nghiên cứu, chúng ta tìm hiểu về các nguyên lý chế tạo bó vỉa hè, trong đó việc sử dụng máy đúc bó vỉa hè cốp pha trượt liên tục tại chỗ chiếm nhiều ưu điểm và cần được áp dụng để nâng cao năng suất. Một mô hình máy đúc bó vỉa hè sử dụng nguyên lý đúc liên tục tại chỗ kết hợp với rung động được tạo ra bởi đầm dùi đã được chế tạo và tiến hành thực nghiệm. Kết quả thực nghiệm cũng tìm ra được mối quan hệ giữa độ cứng bê tông của bó vỉa hè đầu ra và hai thông số đầu vào đó là vị trí đầm dùi và tỉ số nén khuôn. Đây là cơ sở để thiết kế tối ưu một vài thông số kỹ thuật của máy đúc bó vỉa hè sử dụng nguyên lý đúc tại chỗ liên tục. Tuy nhiên, bài nghiên cứu vẫn còn chưa đầy đủ. Chẳng hạn như việc đánh giá chất lượng bó vỉa hè sau khi đúc ra chỉ dựa vào một thông số đó là độ cứng bê tông mà chưa khảo sát hết các yếu tố khác như độ nhẵn bóng bề mặt bê tông. Cũng như các thông số đầu vào khác chưa được xem xét đến, ví dụ như độ cao của vị trí đặt đầm dùi, mác bê tông,….

Đây là những yếu tố cần được khảo sát trong các nghiên cứu tiếp theo.

Ngày nhận bài: **18/4/2025**
Ngày phản biện: **06/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Hồng Ngân, "*Máy sản xuất vật liệu và cấu kiện xây dựng*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2001.

[2]. Trần Thị Hồng, Nguyễn Hồng Ngân, "*Kỹ thuật rung trong máy xây dựng*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2008.

[3]. Vũ Liêm Chính, "*Cơ sở thiết kế máy xây dựng*". NXB. Xây dựng, 2002.

[4]. Nguyễn Hữu Lộc, "*Quy hoạch và phân tích thực nghiệm*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2011.

[5]. Lưu Thanh Tùng, Lương Văn Tới, "*Nghiên cứu những thông số chính ảnh hưởng đến chất lượng bê tông của máy bó vỉa hè bê tông cốp pha trượt*". Tạp chí Khoa học & Công nghệ, số 17/2013.

[6]. Lưu Thanh Tùng, Đề tài nghiên cứu khoa học "*Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy bó vỉa hè bê tông cốp pha trượt*".

[7]. Trần Đăng Phương, Bùi Trọng Nhân, Luận văn tốt nghiệp "*Tìm hiểu, thiết kế, chế tạo máy bó vỉa hè loại rung*". Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.

[8]. P.F.G. Banfill, M.A.O.M. Teixeira, R.J.M. Craik, "*Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation*". Cement and Concrete Research 41, pp. 932-941, 2011.

[9]. Ralph O. Lane, "*Behavior of Fresh Concrete During Vibration*". Reported by ACI Committee 30, 1998.

[10]. Scott Edward Burlingame, "*Application of infrared imaging to fresh concrete: monitoring internal vibration*". A master thesis, 2004.

[11]. François de Larrard, Nicolas Roussel, "*Flow Simulation of Fresh Concrete under a Slipform Machine*". Road Materials and Pavement Design, pp. 547-566, 2011.

[12]. Michael R. Dunham, Adam S. Rush, James H. Hanson, "*Effects of Induced Vibrations on Early Age Concrete*". Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 21, No. 3, 2007.

[13]. Shigeyuki Date, Yuji Goryozono, Shinichiro Hashimoto, "*Study on Consolidation of Concrete with Vibration*". International Conference on Solid State Devices and Materials Science, 2012.

ĐIỀU KHIỂN ROBOT ĐA HƯỚNG BA BÁNH BẰNG PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO MÔ HÌNH

CONTROLLING THREE-WHEELED OMNIDIRECTIONAL ROBOTS USING MODEL PREDICTIVE CONTROL

Nguyễn Hoàng Long, Huỳnh Hồ Trung Tịnh, Nguyễn Duy Ánh*
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
**Email: ndanhcdt@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển dự báo mô hình (MPC) cho robot đa hướng ba bánh. Phương pháp đề xuất sử dụng chiến lược tìm kiếm tối ưu đơn giản để giảm thiểu độ phức tạp tính toán, đồng thời duy trì khả năng theo dõi quỹ đạo chính xác. Các thí nghiệm mô phỏng trên các quỹ đạo khác nhau cho thấy phương pháp MPC đạt được sai số trung bình thấp và xử lý tốt các yếu tố phi tuyến như trượt bánh xe và nhiễu cảm biến IMU. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc áp dụng phương pháp MPC trong các ứng dụng robot đa hướng yêu cầu độ chính xác cao.

Từ khóa: *Robot đa hướng; Điều khiển dự báo mô hình; Bánh xe omni; Điều khiển phi tuyến; Theo dõi quỹ đạo.*

ABSTRACT

This paper presents a Model Predictive Control (MPC) method for three-wheeled omnidirectional robots. The proposed MPC method employs a simplified optimization search strategy to reduce computational complexity while maintaining accurate trajectory tracking capabilities. Simulation experiments on various trajectories (circle, square, and figure-8) demonstrate that the MPC method achieves low average error and effectively handles nonlinear factors such as wheel slip and IMU sensor noise. The research results provide a scientific basis for applying MPC in omnidirectional robot applications requiring high precision.

Keywords: *Omnidirectional robot; Model predictive control; Omni wheel; Nonlinear control; Trajectory tracking.*

☞

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Robot đa hướng đang ngày càng được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực từ sản xuất công nghiệp đến dịch vụ và giải trí, nhờ khả năng di chuyển linh hoạt trong các không gian hạn chế [1]. Khác với các robot di động thông thường, robot đa hướng có thể di chuyển theo bất kỳ hướng nào mà không cần thay đổi hướng của khung xe. Đặc điểm này mang lại lợi thế lớn trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác và linh hoạt cao [2].

Trong số các cấu hình robot đa hướng, thiết kế ba bánh omni được ưa chuộng nhờ tính đơn giản và hiệu quả [3]. Tuy nhiên, việc điều khiển loại robot này gặp nhiều thách thức do tính phi tuyến trong mô hình động học và các yếu tố bất định như trượt bánh xe, ma sát và nhiễu từ cảm biến. Các phương pháp điều khiển truyền thống như PID thường không đủ khả năng xử lý hiệu quả các yếu tố phức tạp này [4].

Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) là một phương pháp điều khiển tiên tiến có khả năng dự đoán hành vi tương lai của hệ thống và tối ưu hóa các đầu vào điều khiển [5-7]. Tuy nhiên, việc triển khai MPC thường đòi hỏi các công cụ tối ưu hóa phức tạp, gây khó khăn trong việc áp dụng trên các hệ thống nhúng với tài nguyên tính toán hạn chế.

Trong nghiên cứu này, nội dung trình bày một phương pháp MPC đơn giản cho robot đa hướng ba bánh, sử dụng chiến lược tìm kiếm tối ưu hiệu quả để giảm thiểu độ phức tạp tính toán. Mục tiêu chính của nghiên cứu bao gồm: (1) Phát triển một phương pháp MPC đơn giản và hiệu quả cho robot đa hướng ba bánh; (2) Mô phỏng và đánh giá hiệu suất của phương pháp trên các quỹ đạo khác nhau; (3) Phân tích khả năng xử lý các yếu tố bất định như trượt bánh xe và nhiễu cảm biến.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

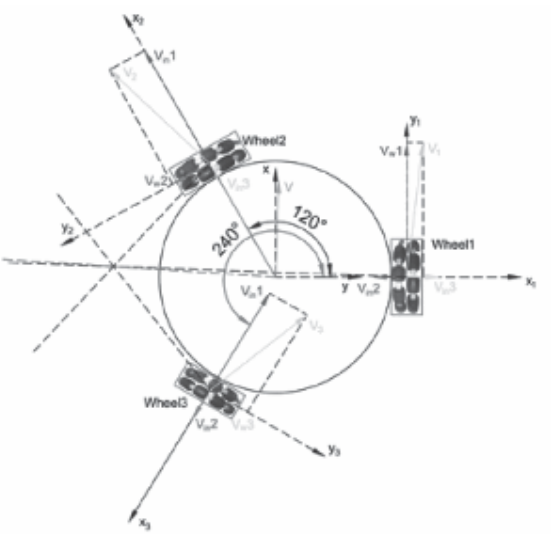
2.1. Mô hình Robot đa hướng ba bánh

2.1.1. Cấu trúc vật lý

Robot đa hướng ba bánh được nghiên cứu có dạng hình tròn với ba bánh xe omni được đặt cách đều nhau 120° trên đường tròn (Hình 1). Mỗi bánh xe có thể quay quanh trục của nó và có khả năng di chuyển vuông góc với hướng quay, cho phép robot di chuyển theo bất kỳ hướng nào trong mặt phẳng.

Các thông số vật lý chính của robot bao gồm:

- Bán kính robot (R): 0,2m;
- Bán kính bánh xe (r): 0,05m;
- Khoảng cách từ tâm robot đến tâm bánh xe (L): 0,15m;
- Vận tốc bánh xe tối đa: 40 rad/s.



Hình 1. Cấu trúc vật lý của robot đa hướng ba bánh, thể hiện vị trí và hướng của các bánh xe

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

2.1.2. Mô hình động học

Động học thuận (Forward Kinematics): động học thuận chuyển đổi từ vận tốc bánh xe thành vận tốc của robot trong không gian Cartesian:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r}{3}\begin{bmatrix} -\sin\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta+\frac{5\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta+\frac{5\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

• ω, ω_2, ω_3 là vận tốc góc của ba bánh xe.

• θ là hướng của robot trong hệ tọa độ toàn cục.

• v_x, v_y là vận tốc dịch chuyển trong hệ tọa độ toàn cục.

• ω là vận tốc góc của robot.

• r là bán kính bánh xe.

• L là khoảng cách từ tâm robot đến tâm bánh xe.

Động học ngược (Inverse Kinematics): Động học ngược chuyển đổi từ vận tốc mong muốn của robot trong không gian Cartesian (vận tốc dịch chuyển v_x, v_y và vận tốc góc ω) thành vận tốc góc của mỗi bánh xe. Mối quan hệ này được mô tả bởi phương trình:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{r}\begin{bmatrix} -\sin\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta+\frac{\pi}{3}\right) & L \\ -\sin(\theta+\pi) & \cos(\theta+\pi) & L \\ -\sin\left(\theta+\frac{5\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta+\frac{5\pi}{3}\right) & L \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}$$

Các phương trình động học này là cơ sở để phát triển bộ điều khiển MPC và mô phỏng hành vi của robot.

2.1.3. Mô hình trượt và ma sát

Để mô phỏng chính xác hơn hành vi của robot trong môi trường thực tế, các yếu tố ảnh hưởng sau được đưa vào mô hình:

1) Ma sát: Nghiên cứu xem xét hai loại ma sát ảnh hưởng đến hoạt động robot: ma sát mặt đất (hệ số 0.01) phát sinh tại điểm tiếp xúc giữa bánh xe và bề mặt, và ma sát khớp (hệ số 0.005) trong các cơ cấu truyền động. Việc mô hình hóa cả hai loại ma sát giúp mô phỏng chính xác hơn hành vi robot trong môi trường thực tế và hỗ trợ bộ điều khiển MPC dự đoán, bù trừ hiệu quả các ảnh hưởng động lực học phức tạp.

2) Hiệu ứng trượt bánh xe: Nghiên cứu mô hình hóa hai loại trượt bánh xe: trượt dọc (theo hướng quay - Longitudinal slip) với phân phối Gaussian (trung bình 0.01, độ lệch chuẩn 0.005) và trượt ngang (vuông góc với hướng quay - Lateral slip) cũng với phân phối Gaussian (trung bình 0.005, độ lệch chuẩn 0.002). Ảnh hưởng của trượt được mô hình hóa bằng cách giảm vận tốc thực tế so với vận tốc lý thuyết của bánh xe. Việc mô phỏng cả hai hiệu ứng này giúp bộ điều khiển MPC dự đoán và thích ứng tốt hơn với các điều kiện bất định trong môi trường thực tế. Ảnh hưởng của trượt bánh xe được mô hình hóa bằng cách giảm vận tốc thực tế của bánh xe so với vận tốc lý thuyết:

$$\omega_{actual} = \omega_{command} \times (1\text{-slip})$$

Với góc trượt ngang, chúng tôi sử dụng mô hình:

$$v_x = v_{magnitude} \times \cos(slip_angle) \times (1 - lateral_slip_factor \times \sin^2(slip_angle)^2)$$

$$v_x = v_{magnitude} \times \sin(slip_angle) \times (1 - lateral_slip_factor \times \cos^2(slip_angle)^2)$$

2.2. Phương pháp điều khiển dự báo mô hình (MPC)

2.2.1. Nguyên lý hoạt động

Điều khiển dự báo mô hình (MPC) là một phương pháp điều khiển tiên tiến dựa trên ☞

việc dự đoán hành vi tương lai của hệ thống và tối ưu hóa các đầu vào điều khiển. Phương pháp MPC hoạt động theo các bước cơ bản sau:

1) Đo trạng thái hiện tại: Xác định vị trí (x, y) và hướng (θ) hiện tại của robot.

2) Dự đoán trạng thái tương lai: Sử dụng mô hình động học để dự đoán vị trí và hướng trong N bước tiếp theo (horizon N).

3) Xác định quỹ đạo mục tiêu: Xác định các điểm mục tiêu trên quỹ đạo mong muốn cho N bước tiếp theo.

4) Tối ưu hóa điều khiển: Tính toán các đầu vào điều khiển tối ưu để giảm thiểu sai số giữa quỹ đạo dự đoán và quỹ đạo mục tiêu.

5) Áp dụng điều khiển: Chỉ áp dụng đầu vào điều khiển cho bước đầu tiên.

6) Lặp lại chu trình: Cập nhật trạng thái hiện tại và lặp lại các bước trên.

2.2.2. Dự đoán trạng thái

Để dự đoán trạng thái tương lai của robot, nghiên cứu sử dụng mô hình động học đơn giản hóa. Cụ thể, tại thời điểm k và với đầu vào điều khiển là vận tốc bánh xe ω_1, ω_2, ω_3, trạng thái tiếp theo của robot được dự đoán như sau:

1) Tính toán vận tốc robot từ vận tốc bánh xe sử dụng phương trình động học thuận.

2) Cập nhật hướng của robot: $\theta_{k+1} = \theta_k + \omega \times dt$. Với dt là khoảng thời gian giữa hai bước liên tiếp.

3) Cập nhật vị trí của robot:

$x_{k+1} = x_k + (v_x \cos(\theta_k) - v_y \sin(\theta_k)) \times dt$ $y_{k+1} = y_k + (v_x \sin(\theta_k) - v_y \cos(\theta_k)) \times dt$

Với dt = 0,05s là khoảng thời gian giữa hai bước liên tiếp.

Bằng cách lặp lại quá trình này trạng thái của robot trong N bước tiếp theo (N = 15 trong nghiên cứu này, tương đương với 0,75 giây) có thể được dự đoán.

2.2.3. Hàm chi phí

Hàm chi phí được thiết kế để cân bằng giữa độ chính xác theo dõi quỹ đạo và nỗ lực điều khiển. Hàm chi phí tổng thể bao gồm ba thành phần chính:

1) Chi phí vị trí: Phạt sai lệch giữa vị trí dự đoán và vị trí mục tiêu:

$$J_{position} = w_{pos} \times \sum_{i=1}^{N} \gamma^i \times \|(x_i, y_i) - (x_{target,i}, y_{target,i})\|^2$$

2) Chi phí hướng: Phạt sai lệch giữa vị trí dự đoán và hướng mong muốn:

$$J_{orientation} = w_{orient} \times \sum_{i=1}^{N} \gamma^i \times |\theta_i - \theta_{desired,i}|$$

3) Chi phí điều khiển: Phạt nỗ lực điều khiển để tránh thay đổi đột ngột:

$$J_{control} = w_{control} \times \sum_{i=1}^{N} \gamma^i \times \|\omega_i\|^2$$

Trong đó:

w_{pos}, w_{orient}, $w_{control}$ là các trọng số tương ứng với từng thành phần.

$\gamma \in (0,1]$ là hệ số giảm (discount factor) để ưu tiên các hành động sớm hơn trong horizon.

$\|\bullet\|$ ký hiệu chuẩn Euclidean.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Trong nghiên cứu này, các giá trị được sử dụng bao gồm $w_{pos} = 40.0$, $w_{orient} = 5.0$, $w_{control} = 0.05$ và $\gamma = 0.95$. Những tham số này được lựa chọn cẩn thận để cân bằng giữa độ chính xác theo dõi quỹ đạo và nỗ lực điều khiển, đồng thời tạo ra phản ứng điều khiển mượt mà và ổn định cho robot đa hướng ba bánh.

2.2.4. Phương pháp tối ưu hóa đơn giản

Thay vì sử dụng các công cụ tối ưu hóa phức tạp, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp tìm kiếm hiệu quả trong không gian điều khiển. Phương pháp này bao gồm các bước sau:

1) Tính toán điều khiển cơ sở: Dựa trên lỗi vị trí và hướng hiện tại, tính toán một đầu vào điều khiển cơ sở: $v_{linear} = \min(K_p \times \|e_{pos}\|, v_{max})\omega = K_\omega \times e_\theta$. Trong đó: e_{pos} là lỗi vị trí hiện tại, e_{theta} là lỗi hướng hiện tại, K_p, K_ω là các hệ số tỉ lệ, v_{max} là giới hạn vận tốc.

2) Chuyển đổi sang vận tốc bánh xe: Sử dụng động học ngược để chuyển đổi vận tốc mong muốn thành vận tốc bánh xe cơ sở.

3) Tạo các biến thể điều khiển: Tạo một tập hợp các biến thể của điều khiển cơ sở bằng cách thay đổi các hệ số v_x, v_y, ω trong một phạm vi xác định:

$$\omega_{test} = \begin{bmatrix} \omega_{1,base} \times vx_{var} \\ \omega_{2,base} \times vy_{var} \\ \omega_{3,base} \times \omega_{var} \end{bmatrix}$$

4) Đánh giá chi phí: Tính toán chi phí của mỗi biến thể bằng cách mô phỏng phản ứng của robot và tính tổng chi phí trong horizon.

5) Chọn điều khiển tối ưu: Chọn biến thể có chi phí thấp nhất làm đầu vào điều khiển.

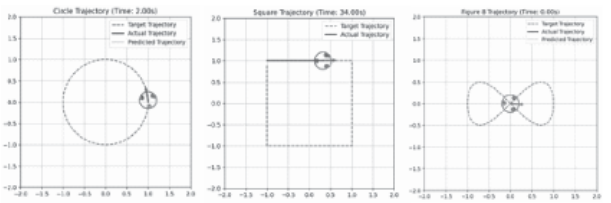
Thuật toán 1: Thuật toán tối ưu hóa đơn giản cho MPC

```
procedure OPT-WHEEL-VEL(x, y, θ, target_trajectory)
    e_pos ← compute_position_error(x, y, target_trajectory)
    e_theta ← compute_orientation_error(θ, target_trajectory)
    v_linear ← compute_linear_velocity(e_pos)
    ω ← compute_angular_velocity(e_theta)
    [ω1_base, ω2_base, ω3_base] ← kinematic_transform(v_linear, ω)
    cost_min ← ∞
    ω1, ω2, ω3 ← 0, 0, 0
    for v_x_var ∈ [0.7, 1.3] do
        for v_y_var ∈ [0.7, 1.3] do
            for ω_var ∈ [0.7, 1.3] do
                v_test ← v_linear × [v_x_var, v_y_var]
                ω_test ← ω × ω_var
                [ω1_test, ω2_test, ω3_test] ← kinematic_transform(v_test, ω_test)
                [ω1_test, ω2_test, ω3_test] ← clip_to_limits(ω1_test, ω2_test, ω3_test)
                cost ← simulate_cost([ω1_test, ω2_test, ω3_test], target_trajectory)
                if cost < cost_min then
                    cost_min ← cost
                    ω1, ω2, ω3 ← ω1_test, ω2_test, ω3_test
                end if
            end for
        end for
    end for
    return ω1, ω2, ω3
end procedure
```

☞

2.3. Thiết lập mô phỏng

Các mô phỏng được tiến hành để đánh giá hiệu suất của bộ điều khiển MPC với thông số: tần số điều khiển 20Hz (dt = 0.05s), thời gian mô phỏng 30 giây, horizon dự đoán 15 bước (0.75 giây), và 7 mẫu cho mỗi chiều của biến điều khiển. Ba quỹ đạo tiêu chuẩn được sử dụng: hình tròn (bán kính 1.0m) để đánh giá khả năng duy trì vận tốc góc không đổi; hình vuông (cạnh 1.5m) để thử thách khả năng xử lý chuyển hướng đột ngột; và hình số 8 (2.0m × 1.0m) để kiểm tra khả năng thích ứng với thay đổi đồng thời vận tốc và hướng (Hình 2). Mô phỏng được thực hiện trong Python với mô hình robot và bộ điều khiển MPC như đã mô tả.



(a) (b) (c)

Hình 2. Ba quỹ đạo được sử dụng trong mô phỏng: (a) Hình tròn, (b) Hình vuông, (c) Hình số 8

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

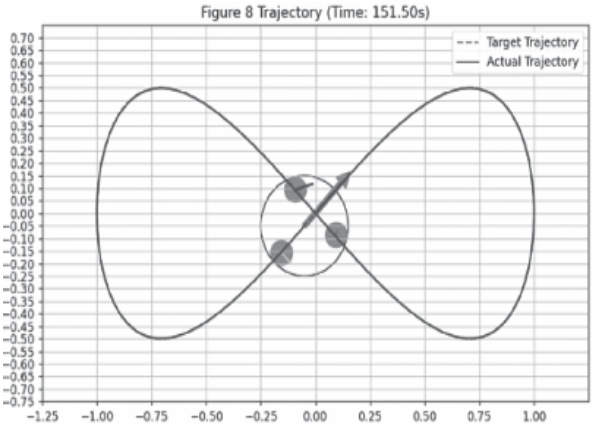
3.1. Hiệu suất theo dõi quỹ đạo

Hiệu suất theo dõi quỹ đạo của phương pháp MPC được đánh giá qua các thí nghiệm mô phỏng trên ba loại quỹ đạo đặc trưng. Bảng 1 trình bày kết quả định lượng về sai số theo dõi quỹ đạo.

Bảng 1. Hiệu suất theo dõi quỹ đạo của MPC

Quỹ đạo	Sai số trung bình (m)	Sai số tối đa (m)	RMSE (m)
Hình tròn	0,0009	0,0012	0,0009
Hình vuông	0,0009	0,0118	0,0013
Hình số 8	0,0010	0,0021	0,0010

Kết quả cho thấy phương pháp MPC đạt độ chính xác cao với sai số trung bình dưới 1mm trên cả ba quỹ đạo. Quỹ đạo hình tròn cho hiệu suất tốt nhất (sai số tối đa 1,2mm) nhờ tính liên tục trong chuyển động. Quỹ đạo hình vuông đặt ra thách thức lớn hơn với sai số tối đa lên đến 11,8mm tại các góc, nhưng sai số trung bình vẫn duy trì ở mức thấp (0,9mm). Quỹ đạo hình số 8, dù đòi hỏi thay đổi liên tục cả tốc độ và hướng, vẫn đạt hiệu suất tốt với sai số tối đa chỉ 2,1mm. Hình 3 cho thấy quỹ đạo thực tế gần như trùng khớp với quỹ đạo mong muốn, với sai lệch không đáng kể ngay cả tại các điểm uốn cong phức tạp.

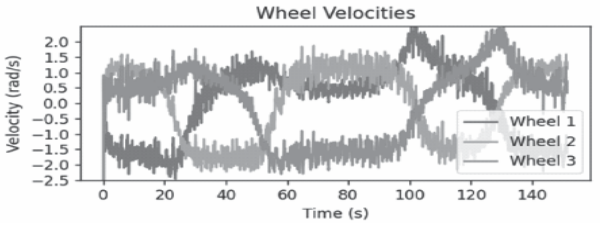


Hình 3. Quỹ đạo thực tế của robot khi sử dụng phương pháp MPC trên quỹ đạo hình số 8.

3.2. Phân tích vận tốc bánh xe và lỗi vị trí

Hình 4 trình bày biến thiên vận tốc của ba bánh xe khi robot theo dõi quỹ đạo hình số 8. Quan sát cho thấy bộ điều khiển MPC tạo ra hồ sơ vận tốc mượt mà cho cả ba bánh xe, với biên độ dao động nằm trong khoảng -2,6 rad/s đến 3,0 rad/s. Đặc biệt, tại các điểm chuyển hướng, sự thay đổi vận tốc diễn ra liên tục mà không có đột biến, góp phần giảm thiểu hiện tượng rung lắc và tăng độ ổn định trong quá trình di chuyển.

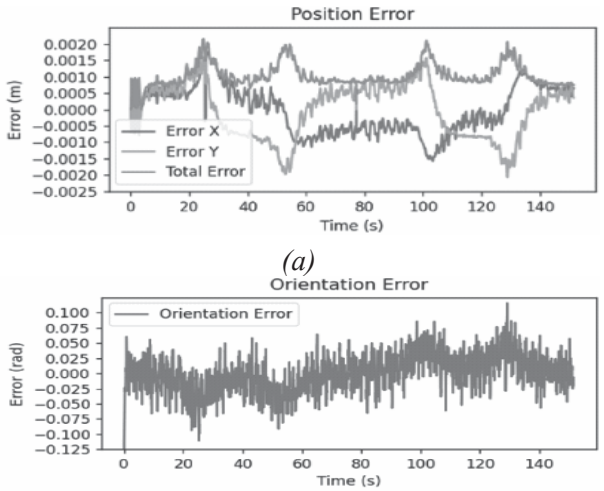
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



Hình 4. Vận tốc của ba bánh xe khi robot theo dõi quỹ đạo hình số 8.

Hình 5(a) thể hiện sai số vị trí theo trục x và trục y khi robot theo dõi quỹ đạo hình số 8. Sai số dao động với biên độ nhỏ và hội tụ nhanh về không sau các điểm chuyển hướng, với giá trị tối đa không vượt quá 2,1mm. Điều này chứng tỏ khả năng thích ứng nhanh của bộ điều khiển MPC với các thay đổi trong quỹ đạo mục tiêu.

Hình 5(b) minh họa sai số hướng quay của robot, dao động trong khoảng ±0,12 radian (khoảng ±6,9 độ). Đáng chú ý, tại các điểm uốn cong của quỹ đạo hình số 8, bộ điều khiển MPC có khả năng dự đoán và điều chỉnh hướng trước, giảm thiểu hiện tượng quá điều chỉnh (overshoot) thường gặp trong các phương pháp điều khiển truyền thống.

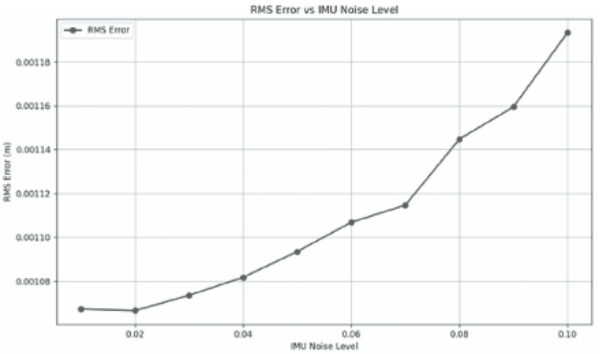


(b)

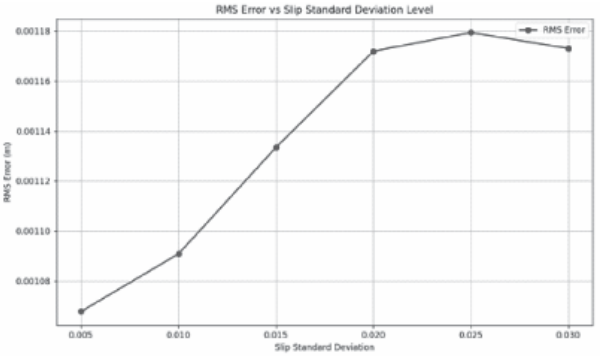
Hình 5. Sai số khi robot theo dõi quỹ đạo hình số 8: (a) Vị trí theo trục x, trục y; (b) Hướng quay.

3.3. Ảnh hưởng của nhiễu và trượt bánh xe

Hình 6 thể hiện ảnh hưởng của nhiễu IMU đến hiệu suất theo dõi quỹ đạo của robot khi di chuyển theo hình số 8. Kết quả cho thấy phương pháp MPC duy trì khả năng chống chịu tốt khi mức độ nhiễu tăng lên. Cụ thể, khi độ lệch chuẩn nhiễu tăng từ 0,01 đến 0,1 radian, sai số trung bình chỉ tăng từ 0,00108m lên 0,00118m, tương đương với mức tăng khoảng 9%.



Hình 6. Sai số trung bình của robot khi theo dõi quỹ đạo hình số 8 với các mức độ nhiễu IMU khác nhau.



Hình 7. Ảnh hưởng của trượt dọc đến hiệu suất theo dõi quỹ đạo.

Tương tự, Hình 7 minh họa ảnh hưởng của hiệu ứng trượt dọc đến hiệu suất theo dõi quỹ đạo. Khi hệ số trượt dọc tăng từ 0,005 đến 0,03, sai số trung bình tăng từ 0,00108m lên khoảng 0,00118m (tăng 9,3%). Kết quả này chứng tỏ bộ điều khiển MPC có khả năng thích ☞

ứng tốt với các điều kiện bất lợi nhờ cơ chế dự đoán và tối ưu hóa điều khiển liên tục.

3.4. Thời gian tính toán

Thời gian tính toán trung bình cho mỗi vòng lặp điều khiển là 5,587ms, đủ để đáp ứng yêu cầu điều khiển thời gian thực với tần số 20Hz (chu kỳ 50ms).

3.5. Thảo luận

3.5.1. Ưu điểm của phương pháp MPC đề xuất

Phương pháp MPC đạt hiệu suất theo dõi quỹ đạo cao với sai số trung bình dưới 2mm, đủ cho nhiều ứng dụng thực tế. Khả năng dự đoán và thích ứng giúp giảm thiểu hiện tượng quá điều chỉnh tại các điểm chuyển hướng. Bộ điều khiển thể hiện khả năng chống chịu tốt với nhiễu và trượt bánh xe, đồng thời duy trì chi phí tính toán hợp lý (5.587ms/chu kỳ) cho phép triển khai thời gian thực.

3.5.2. Hạn chế và cải tiến tiềm năng

Phương pháp tìm kiếm hiện tại có thể hội tụ đến tối ưu cục bộ thay vì tối ưu toàn cục. Mô hình động học được sử dụng bỏ qua một số hiệu ứng động lực học phức tạp, và phương pháp chưa xử lý các ràng buộc như tránh chướng ngại vật. Các hướng cải tiến bao gồm: cải thiện chiến lược tìm kiếm, tích hợp mô hình học máy để mô phỏng chính xác hơn các hiệu ứng phi tuyến, và phát triển phương pháp xử lý các ràng buộc phức tạp.

3.5.3. Ứng dụng thực tế

Phương pháp MPC đề xuất có tiềm năng ứng dụng trong robot dịch vụ di chuyển trong môi trường phức tạp, AGV trong logistic tự động, robot kiểm tra và giám sát cơ sở hạ tầng, cũng như nền tảng robot giáo dục chi phí thấp.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày một phương pháp điều khiển dự báo mô hình (MPC) đơn giản và hiệu quả cho robot đa hướng ba bánh. Phương pháp sử dụng chiến lược tìm kiếm tối ưu đơn giản nhằm giảm thiểu độ phức tạp tính toán mà vẫn duy trì hiệu suất cao. Kết quả mô phỏng trên ba loại quỹ đạo khác nhau cho thấy bộ điều khiển đạt sai số trung bình dưới 1mm và sai số tối đa dưới 12mm, đồng thời thể hiện khả năng chống chịu tốt với nhiễu IMU và hiệu ứng trượt bánh xe. Với thời gian tính toán trung bình 5.587ms cho mỗi chu kỳ điều khiển, phương pháp phù hợp cho triển khai thời gian thực trên các hệ thống nhúng. Những kết quả này mở ra tiềm năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực từ robot dịch vụ đến logistic tự động, nơi yêu cầu độ chính xác cao trong di chuyển.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh thông qua đề tài mã số T-CK-2023-04. Chúng tôi cảm ơn sự hỗ trợ về thời gian và cơ sở vật chất từ Trường Đại học Bách Khoa (HCMUT), Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (VNU-HCM).❖

Ngày nhận bài: **02/4/2025**
Ngày phản biện: **17/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Campion, G., Bastin, G., & D'Andréa-Novel, B. (1996), "*Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots*". IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12(1), 47-62.

[2]. Li, X., & Zell, A. (2009), "*Motion control of an omnidirectional mobile robot*". In Informatics in Control, Automation and Robotics (pp. 181-193). Springer, Berlin, Heidelberg.

[3]. Doroftei, I., Grosu, V., & Spinu, V. (2007), "*Omnidirectional mobile robot – Design and implementation*". In Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots (pp. 511-528). IntechOpen.

[4]. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006), "*Advanced PID control*". ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

[5]. Killpack, M., Deyle, T., Anderson, C., & Kemp, C. C. (2010, December), "*Visual odometry and control for an omnidirectional mobile robot with a downward-facing camera*". In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 139-146). IEEE.

[6]. Klancar, G., & Skrjanc, I. (2007), "*Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time*". Robotics and Autonomous Systems, 55(6), 460-469.

[7]. Wang, C., Liu, X., Yang, X., Hu, F., Jiang, A., & Yang, C. (2018), "*Trajectory tracking of an omni-directional wheeled mobile robot using a model predictive control strategy*". Applied Sciences, 8(2), 231.

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN NHẰM ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA QUÁ TRÌNH UỐN TỚI ĐỘ CHÍNH XÁC GIA CÔNG ỐNG THÉP TÀU THỦY

BUILDING A MATHEMATICAL MODEL TO ASSESS THE IMPACT OF BENDING PROCESS ON THE ACCURACY OF PROCESSING SHIP STEEL PIPE

TS. **Ngô Gia Việt**
Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: vietng.vck@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Quy trình công nghệ thiết kế, sản xuất, gia công và lắp ráp hệ thống đường ống trong các ngành công nghiệp, đặc biệt trong ngành công nghiệp đóng tàu có tỉ trọng kết cấu lớn, có độ phức tạp cao, đòi hỏi tính chính xác, ổn định. Việc dự đoán được các khả năng sai số có thể xảy ra khi gia công ống cho phép đề xuất các phương án điều chỉnh và bù hòa sai số khi lắp ráp ống ngay trong giai đoạn thiết kế, thông qua đó tăng cường tính chính xác lắp ráp và nâng cao tỉ lệ ống gia công theo bản vẽ thiết kế. Bài báo tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình uốn ống, xây dựng mô hình toán mô tả tọa độ thực tế của ống có tính tới các sai lệch khi gia công, là cơ sở để xác định miền sai số của đoạn ống trong các giai đoạn thiết kế và gia công.

Từ khóa: *Hệ thống đường ống; Sai số; Thiết kế tàu thủy; Quy trình công nghệ; Mô hình toán.*

ABSTRACT

The technological process of designing, manufacturing, processing and assembling pipeline systems in industries, especially in the shipbuilding industry, has a large structural proportion, high complexity, and requires accuracy and stability. Predicting possible errors that may occur during pipe processing allows proposing solutions to adjust and compensate for errors during pipe assembly right in the design stage, thereby increasing the accuracy of assembly and increasing the rate of pipes processed according to design drawings. The article focuses on studying the influence of the pipe bending process, building a mathematical model describing the actual coordinates of the pipe taking into account the deviations during processing, which is the basis for determining the error domain of the pipe section during the design and processing stages.

Keywords: *Piping system; Error; Ship design; Technological process; Mathematical description.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ống thép với những ưu điểm nổi bật về khả năng chịu lực tốt, chịu được bào mòn và áp suất cao được ứng dụng phổ biến trong nhiều ngành công nghiệp. Trong ngành công nghiệp đóng tàu, ống thép chiếm vai trò và tỉ trọng kết cấu lớn, có mặt trong hầu hết các hệ thống chức năng trên tàu thủy như hệ thống bơm và cung cấp nhiên liệu, hệ thống nước dằn, hệ thống cứu hỏa, hệ thống hút khô và các hệ thống chuyên dụng khác. Đặc biệt, cùng với yêu cầu ngày càng đa dạng trong lĩnh vực vận tải đường thủy, các con tàu được thiết kế và đóng mới có xu hướng ngày càng hiện đại và mang tính chuyên môn hóa cao, được trang bị nhiều hệ thống phức tạp, trong đó hệ thống đường ống đóng vai trò quan trọng. Mức độ phức tạp trong quá trình thiết kế tàu thủy ngày càng tăng kéo theo mật độ phân bố ống ngày càng lớn, đòi hỏi hệ thống đường ống phải có độ chính xác cao trong ngay trong quá trình thiết kế, gia công và lắp ráp.

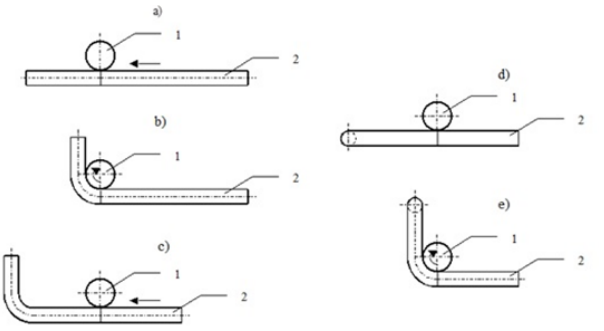
Hiện nay, việc ứng dụng các công nghệ, phần mềm hiện đại cho phép thiết kế hệ thống đường ống trên tàu thủy một cách chi tiết. Toàn bộ ống riêng lẻ của hệ thống đường ống được mô tả thông qua các bản vẽ với đầy đủ kích thước cụ thể. Mặc dù vậy, vẫn còn tồn tại một lượng lớn các ống không thể gia công trực tiếp theo bản vẽ thiết kế [1-3]. Vấn đề trên xuất phát từ việc trong giai đoạn thiết kế không thể dự đoán được các sai số có thể phát sinh trong quá trình gia công và lắp ráp đường ống [4, 5]. Vì vậy, việc phân tích các yếu tố ảnh hưởng tới độ chính xác gia công và lắp ráp đường ống, đồng thời đánh giá được ảnh hưởng của chúng đến kích thước cuối cùng của ống có ý nghĩa trong việc ra quyết định phương án gia công, giúp giảm tỉ lệ gián đoạn và nâng cao hiệu quả sản xuất.

Trong bài báo, tác giả đề xuất nghiên cứu ảnh hưởng của các quy trình công nghệ, đặc biệt là quá trình uốn tới độ chính xác gia công ống, thông qua đó xây dựng mô hình toán nhằm xác định miền sai số phát sinh trong quá trình gia công, cho phép dự đoán các phương án bù hòa sai số và tăng cường tính chính xác lắp ráp của hệ thống đường ống ngay trong giai đoạn thiết kế.

2. QUY TRÌNH CÔNG NGHỆ GIA CÔNG ỐNG THÉP TÀU THỦY

2.1. Quy trình công nghệ gia công ống thép tàu thủy

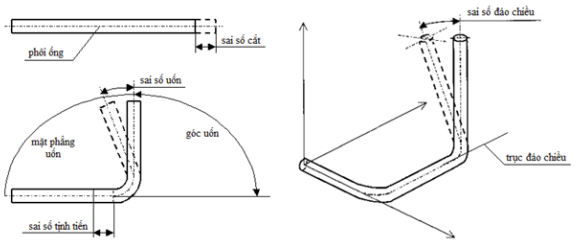
Quy trình công nghệ gia công ống thép tàu thủy bao gồm các công đoạn cắt, uốn và các công đoạn phụ trợ khác nhằm tạo hình ống thép theo kích thước tọa độ từ bản vẽ thiết kế. Các bước gia công bao gồm đẩy tịnh tiến, uốn, đảo chiều và cắt, trong đó, mỗi công đoạn thực hiện trên các thiết bị tương ứng với một sai số nhất định nằm trong giới hạn cho phép. Uốn ống được thực hiện trên các máy uốn dạng điều chỉnh thủ công, bán tự động và tự động, đi kèm quá trình cắt trên các máy cắt chuyên dụng.



Hình 1. Quy trình công nghệ gia công ống: a – Đẩy tịnh tiến 1; b – Uốn; c – Đẩy tịnh tiến 2; d – Đảo chiều; e – Uốn

Sai số gia công trong từng công đoạn ảnh hưởng trực tiếp tới sai số cuối cùng của ☞

đoạn ống thành phẩm, được xác định bởi tọa độ điểm đầu và điểm cuối ống. Các sai số được chia thành hai nhóm chính, sai số độ dài liên quan đến quá trình cắt và đẩy tịnh tiến, sai số góc liên quan đến quá trình uốn và đảo chiều, trong đó các sai số góc phức tạp và khó dự đoán hơn, đồng thời có ảnh hưởng lớn hơn đến tọa độ điểm cuối đoạn ống.

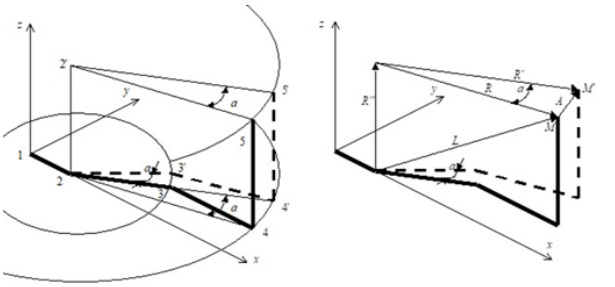


Hình 2. Các dạng sai số trong gia công ống.

Quá trình gia công tạo hình ống thép được thực hiện bởi tổng hợp các công đoạn riêng lẻ với trình tự nhất định, phụ thuộc vào hình dáng đoạn ống. Do đó, việc dự đoán chính xác sai số của điểm cuối ống trong quá trình gia công là không khả thi. Một trong những giải pháp nhằm khắc phục vấn đề trên là đề xuất xây dựng mô hình toán của miền sai số ngay trong giai đoạn thiết kế, đặc biệt là các sai số phát sinh trong các công đoạn uốn ống, qua đó cho phép sơ bộ lên phương án bù hòa miền sai số trong quá trình lắp ráp.

2.2. Phân tích ảnh hưởng của quá trình uốn tới độ chính xác gia công ống thép

Nhằm đánh giá chính xác ảnh hưởng của quá trình uốn tới sai số gia công ống, xét một đoạn ống có hình dáng thiết kế được mô phỏng trong hệ tọa độ không gian ba chiều XYZ với gốc tọa độ đặt tại điểm đầu đoạn ống (Hình 3). Đoạn ống được tạo hình với ba điểm uốn tại các vị trí số 2, 3 và 4, trong đó vị trí số 4 có kết hợp đảo chiều ống. Trên hình, vị trí thiết kế lý thuyết được thể hiện bằng nét liền đậm, vị trí thực tế của đoạn ống sau gia công có tính đến các sai số được thể hiện bởi nét đứt.



Hình 3. Vị trí thiết kế lý thuyết và thực tế của đoạn ống.

Xét công đoạn uốn tại điểm 2 được thực hiện xung quanh trục uốn 22’ vuông góc với mặt phẳng uốn (123). Độ lệch của một điểm bất kỳ trên đoạn ống dưới ảnh hưởng của độ lệch góc quay uốn (a) được xác định trên mặt phẳng uốn, hoặc trên mặt phẳng song song (255’). Đối với các điểm nút, độ lệch được xác định bởi độ dài cung quay 33’ bán kính /23/ đối với nút 3, cung quay 44’ bán kính /24/ đối với nút 4 và cung quay 55’ bán kính /2'5/ đối với nút 5. Trong đó /23/, /24/, /2'5/ được xác định là các đường tâm bán kính tương ứng với các nút 3, 4, 5: /33'/ = /23/·a, /44'/ = /24/·a, /55'/ = /2'5/·a.

Công thức chung tính độ lệch tại một điểm bất kì được xác định bởi: A = R·a trong đó R tương ứng với bán kính tâm quay tại mỗi điểm.

Độ lệch của tọa độ điểm cuối đoạn ống M được mô tả bởi véctơ A(xa, ya, za), là hiệu của hai véctơ bán kính uốn thực tế và lý thuyết R'(X', Y', Z') và R(X-X", Y-Y", Z-Z"):

$$\vec{A} = \vec{R}' - \vec{R} = \vec{R}' - (\vec{L} - \vec{R}")$$

Trong đó, các véctơ L(X, Y, Z) và R"(X", Y", Z") được thể hiện trên hình 3.

Sai số kích thước của điểm cuối đoạn ống theo các chiều x, y, z dưới ảnh hưởng của độ lệch góc uốn (a) được xác định theo công thức:

xa = X' – (X – X"), ya = Y'(Y – Y"), za = Z' – (Z – Z")

Gọi N'(N'x, N'y, N'z) – Véctơ pháp tuyến của mặt phẳng uốn, là tích có hướng của hai véctơ $L_1(X_1, Y_1, Z_1)$ và $L_2(X_2, Y_2, Z_2)$:

$$N'x = Y_1 \cdot Z_2 - Z_1 \cdot Y_2,\ N'y = Z_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot Z_2,\ N'z = X_1 \cdot Y_2 - Y_1 \cdot X_2$$

Góc hợp bởi các véctơ N'(N'x, N'y, N'z) và L(X, Y, Z) được xác định bởi công thức:

$$\cos(\phi) = \frac{N'x \cdot X + N'y \cdot Y + N'z \cdot Z}{\sqrt{N'x^2 + N'y^2 + N'z^2} \cdot \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}$$

Mặt khác, R" = L · cos(ϕ) với

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Ta nhận được phương trình:

$$R'' = \frac{N'x \cdot X + N'y \cdot Y + N'z \cdot Z}{\sqrt{N'x^2 + N'y^2 + N'z^2}}$$

Do các véctơ N'(N'x, N'y, N'z) và R"(X", Y", Z") cùng phương vuông góc với mặt phẳng uốn, do đó ta được tỉ lệ tương ứng của các véctơ cùng phương như sau:

$$\frac{X''}{R''} = \frac{N'x}{N'} \Rightarrow X'' = N'x \cdot \frac{R''}{N'}$$

$$\frac{Y''}{R''} = \frac{N'y}{N'} \Rightarrow Y'' = N'y \cdot \frac{R''}{N'}$$

$$\frac{Z''}{R''} = \frac{N'z}{N'} \Rightarrow Z'' = N'z \cdot \frac{R''}{N'}$$

Từ công thức xác định độ dài:

$$N' = \sqrt{N'x^2 + N'y^2 + N'z^2}$$

Ta nhận được:

$$X'' = \frac{Nx \cdot (N'x \cdot X + N'y \cdot Y + N'z \cdot Z)}{N'x^2 + N'y^2 + N'z^2}$$

$$Y'' = \frac{Ny \cdot (N'x \cdot X + N'y \cdot Y + N'z \cdot Z)}{N'x^2 + N'y^2 + N'z^2}$$

$$Z'' = \frac{Nz \cdot (N'x \cdot X + N'y \cdot Y + N'z \cdot Z)}{N'x^2 + N'y^2 + N'z^2}$$

Góc uốn lý thuyết được xác định bởi góc hợp bởi các véctơ N(Nx, Ny, Nz) và R(X-X", Y-Y", Z-Z"):

$$\cos(\varphi) = \frac{Nx \cdot (X - X'') + Ny \cdot (Y - Y'') + Nz \cdot (Z - Z'')}{\sqrt{Nx^2 + Ny^2 + Nz^2} \cdot \sqrt{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2 + (Z - Z'')^2}}$$

Trong đó, N(Nx, Ny, Nz) – Véctơ pháp tuyến của mặt phẳng hợp bởi L(X, Y, Z) và N'(N'x, N'y, N'z):

$$Nx = Y \cdot N'z - Z \cdot N'y,\ Ny = Z \cdot N'x - X \cdot N'z,\ Nz = X \cdot N'y - Y \cdot N'x$$

Góc uốn trên thực tế có bao gồm các sai số uốn được xác định bởi công thức:

φ' = a + φ

Vậy:

$$\cos\left(a + \arccos\left(\frac{Nx \cdot (X - X'') + Ny \cdot (Y - Y'') + Nz \cdot (Z - Z'')}{\sqrt{Nx^2 + Ny^2 + Nz^2} \cdot \sqrt{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2 + (Z - Z'')^2}}\right)\right) = \frac{Nx \cdot X' + Ny \cdot Y' + Nz \cdot Z'}{\sqrt{Nx^2 + Ny^2 + Nz^2} \cdot \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}} \quad (1)$$

Mặt khác, do bán kính uốn tới điểm cuối đoạn ống là không thay đổi, nên:

$$R = R' \Rightarrow \sqrt{(X - X'')^2 + (Y - Y'')^2 + (Z - Z'')^2} = \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2} \quad (2)$$

Phương trình mặt phẳng uốn được xác định bởi phương trình mặt phẳng qua hai véctơ N(Nx, Ny, Nz) và R(X-X", Y-Y", Z-Z"):

$$\begin{vmatrix} X' & Y' & Z' \\ Nx & Ny & Nz \\ X-X'' & Y-Y'' & Z-Z'' \end{vmatrix} = 0 \qquad (3)$$

Giải hệ phương trình (1), (2), (3) với các biến số X', Y', Z' cho phép xác định tọa độ thực tế của điểm cuối đoạn ống, đã được tính toán với ảnh hưởng của công đoạn uốn, thông qua đó có thể xác định được miền sai số của điểm cuối đoạn ống có thể xảy ra trong quá trình uốn.

Trong trường hợp tổng quát, độ lệch (A_i) đối với một điểm bất kỳ trên đoạn ống với tọa độ lý thuyết điểm cuối đoạn ống M(x,y,z) dưới ảnh hưởng của độ lệch góc uốn (a_i) (hình 4) được xác định bởi phương trình véctơ:

$$A_i \begin{pmatrix} xa_i \\ ya_i \\ za_i \end{pmatrix} = R' \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} - \left(L \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - R'' \begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} \right),$$

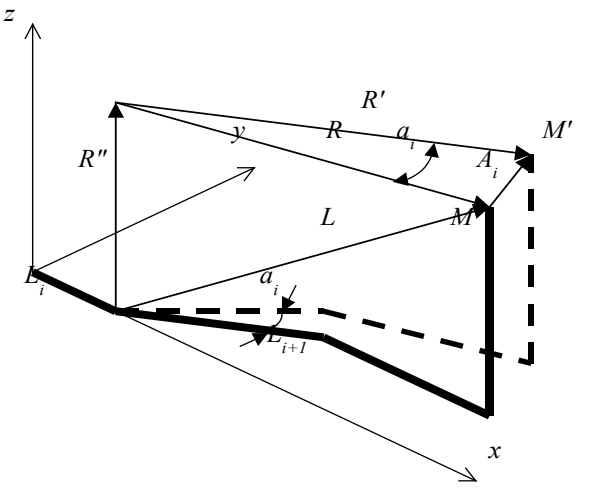
Trong đó, véctơ $R' \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$ cho phép xác định tọa độ thực tế của điểm cuối đoạn ống là nghiệm của hệ phương trình:

$$\left.\begin{aligned} &\cos\left(a_i + \arccos\left(\frac{N\cdot(L-R)}{|N|\cdot|L-R|} \right) \right) = \frac{N\cdot R'}{|N|\cdot|R'|} \\ &|L-R''| = |R'| \\ &R'\cdot N\cdot(L-R'') = 0 \end{aligned}\right\}$$

$$L \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - x_{i+1} \\ y - y_{i+1} \\ z - z_{i+1} \end{pmatrix};$$

$$R'' \begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} Nx \\ Ny \\ Nz \end{pmatrix} \cdot \frac{(L_i \times L_{i+1})\cdot L}{|L_i \times L_{i+1}|};$$

$$N = \left(L \times (L_i \times L_{i+1})\right)$$



Hình 4. Ảnh hưởng của quá trình uốn tới kích thước tọa độ đoạn ống.

4. KẾT LUẬN

Nội dung nghiên cứu tập trung đánh giá ảnh hưởng của các quy trình công nghệ tới sai số gia công đường ống thép tàu thủy, đặc biệt phân tích ảnh hưởng của quá trình uốn tới độ chính xác của kích thước ống. Kết quả nghiên cứu được thể hiện trong các nội dung sau:

- Phân tích quy trình công nghệ gia công ống thép và các loại sai số phát sinh.

- Xây dựng mô hình toán học cho phép đánh xác định tọa độ thực tế và miền sai số

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

của đoạn ống sau quá trình gia công, dưới ảnh hưởng từ sai số uốn.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở nhằm xây dựng các phương án bù hòa sai số gia công ngay trong giai đoạn thiết kế, cho phép nâng cao tỉ lệ ống được gia công trực tiếp theo bản vẽ thiết kế, nâng cao tính chính xác trong quá trình lắp ráp hệ thống đường ống nói riêng và thi công đóng tàu nói chung.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.51.❖

Ngày nhận bài: **01/4/2025**
Ngày phản biện: **15/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ngô Gia Việt, "*Tăng cường tính chính xác lắp ráp của hệ thống đường ống tàu thủy trên cơ sở ứng dụng phép quay các cặp đoạn ống song song*". Giao thông vận tải, T9, (2021) 108-111.

[2]. Ngô Gia Việt, "*Mô hình hóa phương án bù hòa sai số trong quá trình lắp ráp hệ thống đường ống tàu thủy*". Giao thông vận tải, T9, (9/2023) 87-90.

[3]. OCT 5.95057-90, "*Системы судовые и системы судовых энергетических установок". Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов – РТП НПО "Ритм*".

[4]. S.-H. Kim, W.-S. Ruy, B. S. Jang, "*The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD envi-ronment using network optimization*". International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering (2013), Vol. 5, Is. 3, pp. 468-477. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0146.

[5]. Y. Ando, H. Kimura, "*An automatic piping algorithm including elbows and bends*". International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS2011). Trieste, Italy, 20-22, September 2011, Vol. 3, pp. 153-158.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀY LỚP CÁU CẶN ĐẾN HIỆU SUẤT NHIỆT CỦA BỘ TRAO ĐỔI NHIỆT KIỂU ỐNG VỎ

STUDY THE EFFECT OF FOULING THICKNESS ON THE THERMAL PERFORMANCE OF SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS

ThS. **Nguyễn Đức Bình***, ThS. **Nguyễn Mạnh Chiều**
Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
**Email: binhnd.vck@vimaru.edu.vn*

TÓM TẮT

Bộ trao nhiệt (BTN) có vai trò quan trọng trong các hệ thống nhiệt – lạnh. Cáu cặn do các phần tử vật liệu không mong muốn tích tụ trên bề mặt kênh dẫn của BTN. Cáu cặn làm tăng sức cản thủy – nhiệt động lực, giảm hiệu quả và hiệu suất truyền nhiệt của thiết bị. Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp cáu cặn đến hiệu quả làm việc của thiết bị trao đổi nhiệt kiểu ống vỏ, sử dụng trong bộ gia nhiệt không khí, bằng phương pháp mô phỏng số. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất nhiệt suy giảm theo sự gia tăng của chiều dày lớp cáu cặn. Điều này hoàn toàn phù hợp với những kết quả khảo sát bằng lý thuyết cũng như thực nghiệm.

Từ khóa: *Trao đổi nhiệt; Cáu cặn; Mô phỏng số; Hệ số truyền nhiệt; Dòng chảy.*

ABSTRACT

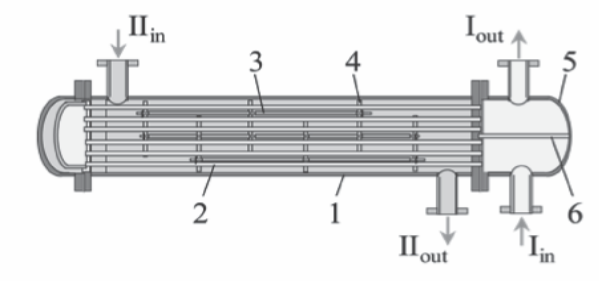
Heat exchangers play an important role in heat and cooling systems. Fouling is due to by unwanted material particles accumulating on the surface of the heat transfer surfaces. These deposits increase hydro-thermodynamic resistance, reducing the heat transfer capacity, thus the thermal performance of the devices. This article studies the influence of fouling thickness on the performance of a shell-and-tube heat exchanger, which is used in an air heater, by using numerical simulation methods. The results show that thermal efficiency decreases with the increase in scale layer thickness. This is well agreed with the previously theoretical and experimental publications.

Keywords: *Heat exchanger; Fouling; Numerical simulation; Heat transfer coefficient; Flow.*

1. TỔNG QUAN

Cáu cặn là lớp vật liệu không mong muốn bám kết lên bề mặt truyền nhiệt của BTN. Chúng làm giảm tiết diện kênh dẫn, thay đổi độ nhám bề mặt, tăng sức cản thủy-nhiệt động lực, làm giảm hiệu quả truyền nhiệt giữa các dòng chất lỏng. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy, cáu cặn là nguyên nhân chính gây ra tổn thất năng lượng, gia tăng chi phí khai thác, bảo dưỡng và sửa chữa thiết bị [1-4].

Sự phát triển của sản xuất và xã hội dẫn đến sử dụng ngày càng nhiều hơn các bộ trao nhiệt. Vì vậy, nghiên cứu cơ chế hình thành, đánh giá tác hại, dự đoán tốc độ phát triển lớp cáu cặn, xây dựng chiến lược bảo trì nhằm khôi phục tính năng làm việc của các bộ trao nhiệt là một thách thức lớn. Các nghiên cứu về cáu cặn hiện nay bao gồm: mô hình hóa và mô phỏng [5-7], đánh giá ảnh hưởng [8-14], phân tích các yếu tố tác động [1, 3], dự báo tốc độ phát triển [2, 15, 16] và xây dựng chiến lược bảo trì [4, 17, 18].



Hình 1. Bộ trao đổi nhiệt kiểu ống – vỏ:
I – Chất lỏng lạnh, II – Chất lỏng nóng, 1 – Vỏ, 2 - Ống, 3 – Thanh giằng, 4 – Tấm hướng dòng, 5 – Nắp che, 6 – Vách ngăn

Bộ trao nhiệt kiểu ống – vỏ có cấu trúc đơn giản, linh hoạt, độ cứng vững cao, dễ chế tạo và bảo dưỡng nên được sử dụng phổ biến nhất [11]. Sơ đồ cấu trúc bộ trao nhiệt kiểu ống – vỏ được minh họa như trên Hình 1. Thiết bị bao gồm các thành phần cấu tạo cơ bản như: Đường ống dẫn (I và II), vỏ (1), cụm ống (2), thanh giằng (3), tấm hướng dòng (4), nắp đậy (5) và vách ngăn (6). Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp cáu cặn đến hiệu quả làm việc của bộ trao nhiệt kiểu ống vỏ, bằng phương pháp mô phỏng số.

2. MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Giả thiết

Mô hình đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp cáu cặn đến hiệu quả làm việc của thiết bị trao đổi nhiệt kiểu ống vỏ được trình bày như trên Hình 2. Mô hình toán được xây dựng dựa trên những giả thiết sau [19]:

- Cáu cặn phân bố đều trên các bề mặt truyền nhiệt;

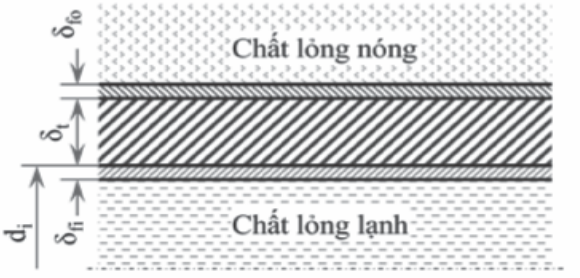
- Hệ số truyền nhiệt tổng thể U = const;

- Nhiệt độ của mỗi chất lỏng là đồng đều trên mọi tiết diện ngang;

- Bỏ qua truyền nhiệt trong các vách chuyển hướng;

- Nhiệt lượng truyền Q = const,

- Nhiệt lượng trao đổi với môi trường xung quanh không đáng kể.



Hình 2. Mô hình truyền nhiệt qua ống có cáu cặn ☞

2.2. Xác định các thông số đánh giá

Nhiệt lượng trao đổi giữa các dòng chất lỏng Q (kW), xác định theo công thức (1) [14, 15]:

$$Q = \dot{m}_c c_{pc} \left(T_{co} - T_{ci}\right) = \dot{m}_h c_{ph} \left(T_{hi} - T_{ho}\right) \quad (1)$$

Trong đó: ṁ – Lưu lượng khối lượng của dòng chất lỏng (kg/s); c_p – Nhiệt dung riêng của chất lỏng (kJ/kgK); T_i, T_o – Nhiệt độ tại cửa vào và nhiệt độ tại cửa ra của chất lỏng (K); c và h – Chất lỏng nóng và lạnh.

Hệ số truyền nhiệt tổng thể U (W/m^{2}K), xác định theo công thức (2) [14, 15]:

$$U = \frac{Q}{A \times F \times LMTD} \quad (2)$$

Trong đó: A – Diện tích bề mặt truyền nhiệt (m^2); F – Hệ số hiệu chỉnh nhiệt độ; LMTD – Chênh nhiệt độ trung bình logarit (K). Chênh nhiệt độ trung bình logarit LMTD (K), với bộ trao nhiệt có các dòng chất lỏng chất lỏng chảy ngược chiều, tính theo công thức (3) [14, 15]:

$$LMTD = \frac{\left(T_{hi} - T_{co}\right) - \left(T_{ho} - T_{ci}\right)}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}\right)} \quad (3)$$

Hệ số cáu cặn R_f được xác định theo công thức (4) [14, 15]:

$$R_f = \frac{1}{U_t} - \frac{1}{U_0} \quad (4)$$

Trong đó: U_t và U_0 (W/m^{2}K) – Tương ứng là hệ số truyền nhiệt tổng thể của thiết bị đã có và chưa có cáu cặn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ví dụ áp dụng

Bảng 1. Các thông số cơ bản của bộ trao nhiệt ống – vỏ

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Trị số
Đường kính ngoài của ống	d_o	m	0.04
Đường kính trong của ống	d_i	m	0.036
Hệ số truyền nhiệt của vật liệu ống	k	W/mK	16.2
Số ống	N	-	365
Chiều dài ống	L_t	m	4.65
Chiều dài vỏ	L_s	m	5.65
Chiều rộng vỏ	B	m	1.4
Chiều cao vỏ	H	m	1.2

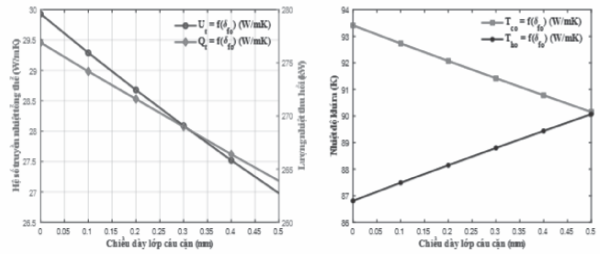
Đối tượng khảo sát được chọn là một bộ trao nhiệt kiểu ống – vỏ được sử dụng để tận dụng nhiệt thải từ máy sấy. Khí xả từ máy sấy có nhiệt độ 150 (°C), độ ẩm tuyệt đối 0.08 (kg_v/kg_a) đi vào bộ trao nhiệt với lưu lượng 4.17 (m^3/s) và lưu động ở phía ngoài ống. Không khí lạnh ngoài môi trường có nhiệt độ 30 (°C), độ ẩm tương đối 46% đi vào bộ trao nhiệt với lưu lượng 4.17 (m^3/s) và lưu động ở phía trong ống. Các thông số cơ bản của bộ trao nhiệt được cho trong Bảng 1.

Trên cơ sở mô hình toán và các thông số của bộ trao nhiệt, nhóm tác giả phát triển một chương trình máy tính trên nền tảng phần mềm EES. Chương trình tính có thể tự động tra các thông số nhiệt động của chất lỏng và giải mô hình toán với những phương trình được cung cấp. Trong nghiên cứu này, cả khí thải và không khí đều được coi là không khí ẩm. Cáu cặn chỉ

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

xảy ra ở phần vỏ do khí xả có nhiều tạp chất. Độ dày của lớp cáu cặn được khảo sát trong khoảng 0 đến 0.5 mm. Hệ số truyền nhiệt của lớp cáu cặn được lựa chọn là 0.05 (W/mK).

3.2. Thảo luận



Hình 3. Ảnh hưởng của chiều dày lớp cáu cặn đến hiệu quả làm việc của BTN

Hình 3 trình bày kết quả khảo sát hiệu quả làm việc của BTN kiểu ống – vỏ với các độ dày khác nhau của lớp cáu cặn. Khi tăng chiều dày lớp cáu cặn từ 0 (mm) (ống sạch) lên 0.5 (mm), hệ số truyền nhiệt tổng thể U giảm 9.86%, từ 29.93 (W/m^{2}K) xuống 26.98 (W/m^{2}K); nhiệt độ dòng khí nóng tại cửa ra tăng khoảng 3.76%, từ 86.81 (°C) lên 90.07 (°C); tương tự, nhiệt độ dòng khí lạnh giảm khoảng 3.49%, từ 93.41 (°C) xuống 90.15 (°C). Kết quả là lượng nhiệt trao đổi giữa hai dòng khí giảm khoảng 4.69%, từ 276.9 (kW) xuống 263.9 (kW). Điều này cho thấy, hiệu quả truyền nhiệt giảm tương ứng với sự gia tăng của chiều dày lớp cáu cặn, hệ thống làm việc ngày càng kém hiệu quả.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày của lớp cáu cặn đến hiệu quả nhiệt của nhóm thiết bị trao đổi nhiệt kiểu ống – vỏ bằng phương pháp mô phỏng số. Kết quả khảo sát thực hiện trên một thiết bị được thiết kế để thu hồi nhiệt thải từ máy sấy vải sợi. Từ kết quả đạt được, có thể kết luận như sau:

• Cáu cặn làm suy giảm chức năng làm việc của bộ trao nhiệt nói riêng và hệ thống năng lượng nói chung.

• Cáu cặn làm tăng mức tiêu thụ năng lượng, tăng chi phí bảo trì và sửa chữa thiết bị.

• Lớp cáu cặn càng dày, hiệu quả trao đổi nhiệt càng giảm, do đó làm giảm hiệu suất chung của hệ thống.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT24-25.48.❖

Tài liệu tham khảo:

[1]. Shen, C., et al., "*Characteristics of fouling development in shell-and-tube heat exchanger: Effects of velocity and installation location*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. 77: p. 439-448.

[2]. Sundar, S., et al., "*Fouling modeling and prediction approach for heat exchangers using deep learning*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. 159.

[3]. Varnaseri, M. and S.M. Peyghambarzadeh, "*Scale Formation in Heat Exchangers*". 2024: Springer Nature Switzerland.

[4]. Lê Quang Hưng, N.T.M.L., Nguyễn Khánh Toản, Nguyễn Thị Lan Anh, "*Xử lý cặn lắng đọng trong thiết bị trao đổi nhiệt của phân xưởng CDU Nhà máy Lọc dầu Dung Quất bằng hóa phẩm*". Tạp chí Dầu Khí, 2016. 7: p. 8.

[5]. Ogbonnaya, S.-K. and O.-O. Ajayi, "*Fouling phenomenon and its effect on heat exchanger: A review*". Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2017. 9(1): p. 1-12.

[6]. Tang, S.-Z., et al., "*Parametric study on fouling mechanism and heat transfer characteristics of tube bundle heat exchangers for reducing fouling considering the deposition and removal mechanisms*". Fuel, 2018. 211: p. 301-311. ☞

[7]. Diaz-Bejarano, E., F. Coletti, and S. Macchietto, "*Modeling and Prediction of Shell-Side Fouling in Shell-and-Tube Heat Exchangers*". Heat Transfer Engineering, 2018. 40(11): p. 845-861.
[8]. Ajayi, O.O. and S.K. Ogbonnaya, "*Fouling Phenomenon and Its Effect on Heat Exchanger: A Review*". Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2017. 9.
[9]. Lemos, J.C., A.L.H. Costa, and M.J. Bagajewicz, "*Design of shell and tube heat exchangers considering the interaction of fouling and hydraulics*". AIChE Journal, 2022. 68(5).
[10]. Markowski, M. and P. Trzcinski, "*On-line control of the heat exchanger network under fouling constraints*". Energy, 2019. 185: p. 521-526.
[11]. Nakao, A., et al., "*Incorporating Fouling Modeling into Shell-and-Tube Heat Exchanger Design*". Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017. 56(15): p. 4377-4385.
[12]. Trafczynski, M., et al., "*The influence of fouling on the dynamic behavior of PID-controlled heat exchangers*". Applied Thermal Engineering, 2016. 109: p. 727-738.
[13]. Trafczynski, M., M. Markowski, and K. Urbaniec, "*Energy saving potential of a simple control strategy for heat exchanger network operation under fouling conditions*". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. 111: p. 355-364.
[14]. Trần Ngọc Trung, N.H.H., Triệu Hùng Trường, "*Giám sát và đánh giá hệ số tắc nghẽn tại bộ trao đổi nhiệt dạng tấm giàn công nghệ xử lí khí Hải Thạch*". Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, 2019. 60(1): p. 9.
[15]. Jradi, R., C. Marvillet, and M.-R. Jeday, "*Application of an Artificial Neural Network Method for the Prediction of the Tube-Side Fouling Resistance in a Shell-And-Tube Heat Exchanger*". Fluid Dynamics & Materials Processing, 2022. 18(5): p. 1511-1519.
[16]. Wang, J., et al., "*Fouling prediction of heat exchanger surface under alternating magnetic field based on IGWO – SVR*". International Journal of Thermal Sciences, 2023. 184.
[17]. Pogiatzis, T., et al., "*Identifying optimal cleaning cycles for heat exchangers subject to fouling and ageing*". Applied Energy, 2012. 89(1): p. 60-66.
[18]. Przemyslaw Trzcinski, M.M., "*Diagnosis of the fouling effects in a shell and tube heat exchanger using artificial neural network*". Chemical Engineering Transactions, 2018. 70: p. 6.
[19]. Takemoto, T., Crittenden, B. D., & Kolaczkowski, S. T., "*Interpretation of Fouling Data in Industrial Shell and Tube Heat Exchangers*". Chemical Engineering Research and Design, 1999. 77: p. 10.

ỨNG DỤNG MATLAB – SIMULINK MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH CHÁY CỦA ĐỘNG CƠ TRANG BỊ HỆ THỐNG PHUN NHIÊN LIỆU COMMONRAIL

MATLAB – SIMULINK APPLICATION TO SIMULATE THE COMBUSTION PROCESS OF ENGINE COMMONRAIL FUEL INJECTION SYSTEM

Nguyễn Thanh Tuấn[1], Khổng Văn Nguyên[2,*]
[1]Khoa Công nghệ ô tô, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Công nghiệp Việt Nam - Hàn Quốc
[2]Khoa Cơ khí Động lực, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên
**Email: kvnguyen251@gmail.com*

TÓM TẮT

Hệ thống nhiên liệu Common rail cung cấp lượng nhiên liệu chính xác, điều chỉnh áp suất phun, thời điểm phun hợp lý nhất từng chế độ làm việc của động cơ. Để đạt được những mục tiêu khác nhau (cải thiện hiệu suất nhiệt động cơ; kiểm soát mức khí thải), các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực động cơ đốt trong đã phát triển nhiều chiến lược phun khác nhau như: thay đổi áp suất phun, hình dạng chùm tia phun, tỷ lệ phun, thời gian phun hoặc thay đổi chiến lược phun: từ phun một giai đoạn đến phun nhiều giai đoạn (phun mồi, phun chính, phun muộn…), và ngay trong giai đoạn phun chính còn có thể tách ra nhiều giai đoạn phun (phun chính nhiều giai đoạn). Bài báo đã xây dựng mô hình mô phỏng quá trình cháy của động cơ diesel dùng hệ thống phun kiểu common rail, có thể sử dụng mô hình để phân tích tốc độ cháy, tốc độ tỏa nhiệt, áp suất xylanh, đồng thời là cơ sở để xây dựng mô hình điều khiển động cơ diesel.

Từ khóa: *Common rail; Mô hình cháy; Tốc độ tỏa nhiệt.*

ABSTRACT

Common rail fuel system provides precise fuel quantity, adjusts injection pressure, and the most reasonable injection timing for each engine operating mode. To achieve different goals (improve engine thermal efficiency; control emissions), researchers in the field of internal combustion engines have developed many different injection strategies such as: changing injection pressure, spray beam shape, injection ratio, injection time or changing injection strategy: from single-stage injection to multi-stage injection (primer injection, main injection, late injection, etc.), and even in the main injection stage, it is possible to separate multiple injection stages (multi-stage main injection). The article has built a simulation model of the combustion process of a diesel engine using a common rail injection system, which can be used to analyze combustion rate, heat dissipation rate, cylinder pressure, and is also the basis for building a diesel engine control model.

Keywords: *Common rail; Combustion model; Heat release rate.*

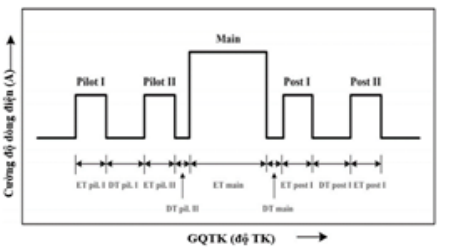
Các từ viết tắt:

TT	Ký hiệu	Ý nghĩa
1	CR	Common rail
2	HTPNL	Hệ thống phun nhiên liệu
3	BCA	Bơm cao áp
4	TDC	Điểm chết trên
5	GTVT	Giao thông vận tải
6	Van SCV	Van điều khiển lượng nhiên liệu vào bơm cao áp

1. TỔNG QUAN

Quá trình cháy trong động cơ diesel phụ thuộc chủ yếu vào cách thức nhiên liệu được phun vào trong buồng cháy, thường được biểu diễn thông qua quy luật phun nhiên liệu hoặc đặc tính phun (Injection Characteristic). Các tiêu chí quan trọng của quá trình phun nhiên liệu diesel bao gồm: thời điểm phun và khoảng thời gian phun; áp suất phun; mức độ phun tơi và sự phân bố nhiên liệu trong không gian buồng cháy; tốc độ phun (lượng nhiên liệu được phun theo góc quay trục khuỷu/trục cam); tổng lượng nhiên liệu cung cấp cho 1 chu trình, [1].

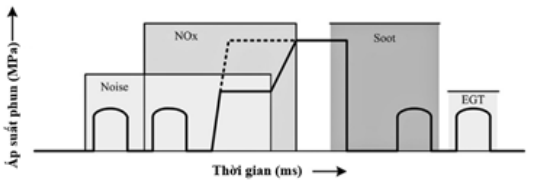
Chất lượng và hiệu quả của quá trình tạo hỗn hợp phụ thuộc chủ yếu vào hệ thống phun nhiên liệu diesel. Những thông số thay đổi của quá trình phun có ảnh hưởng tới quá trình tạo hỗn hợp, diễn biến quá trình cháy (và do đó có ảnh hưởng tới mức độ ô nhiễm, công suất/hiệu suất của động cơ) bao gồm: thời điểm phun nhiên liệu đặc tính phun, áp suất phun; hướng phun và số tia phun. Hệ thống phun nhiên liệu kiểu CommonRail là hệ thống phun nhiên liệu áp suất cao (lên đến 2500 bar), áp suất phun cho phép điều chỉnh độc lập với tốc độ động cơ, cho phép phun nhiều giai đoạn, ngoài ra còn cho phép điều khiển các thông số khác như EGR, tăng áp hoặc bộ xử lý khí thải, [2].



Hình 1. Quy luật phun nhiều giai đoạn, [1]

Trong đó: Pilot I là phun mồi lần 1; Pilot II là phun mồi lần 2; Main là phun chính; Post I là phun bổ sung 1, Post II là phun muộn; ET là khoảng thời gian phun, (ms); DT là khoảng thời gian giữa kết thúc phun của lần trước và bắt đầu phun của lần sau.

Ảnh hưởng của các giai đoạn phun tới quá trình cháy của động cơ được trình bày trên Hình 2. Phun mồi lần 1 và phun mồi lần 2 giảm mạnh tiếng ồn cháy của động cơ, giảm sự hình thành của NOx. Phun bổ sung kết hợp với nửa sau của giai đoạn phun chính có tác dụng tăng cường sự oxi hoá PM, làm giảm phát thải PM. Một lần phun muộn giúp tăng nhiệt độ khí thải, hỗ trợ quá trình tái sinh lọc cho bộ lọc PM, [3].



Hình 2. Ảnh hưởng của các giai đoạn phun, [2]

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Phun mồi lượng nhiên liệu được phun một cách có chủ đích bằng một lượng nhỏ trước quá trình phun chính, được gọi là phun mồi (pilot injection), [4].

Bài báo này trình bày việc xây dựng mô hình mô phỏng quá trình cháy trong xylanh động cơ Hyundai D4FA lắp trên xe Hyundai Getz, Hyundai Accent, đây là các loại xe của hãng Hyundai do Hàn Quốc sản xuất. Động cơ Hyundai D4FA là động cơ 4 xylanh được bố trí thẳng hàng, cơ cấu phân phối khí sử dụng trục cam kép đặt trên nắp máy (DOHC) với 16 xupap, gồm 4 xupap cho mỗi xylanh, 2 xupap nạp và 2 xupap thải. Đây là loại động cơ diesel tăng áp sử dụng hệ thống phun nhiên liệu trực tiếp dùng ống dẫn chung Common Rail điều khiển bởi ECU. Động cơ có tổng dung tích xylanh là 1.5l, công suất cực đại là 81kW ở vòng tua máy 4000v/ph. Mô hình cháy được lựa chọn trong nghiên cứu này là mô hình cháy không chiều, một vùng sử dụng phương trình Wiebe, các thông số của phương trình cháy được xác định dựa trên biện pháp thực nghiệm trên băng thử. Kết quả nghiên cứu phục vụ cho việc xây dựng mô hình điều khiển động cơ diesel common rail.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Quá trình cháy của động cơ diesel sử dụng hệ thống phun nhiên liệu CR thường được chia thành hai giai đoạn cơ bản là cháy nhanh và cháy chính hay cháy khuếch tán, [5, 6]. Phương trình Wiebe tính toán khối lượng nhiên liệu đã cháy theo các nghiên cứu [6, 7, 8], cụ thể như sau:

$$x_{bi} = 1 - e^{\left[-a_i\left(\frac{\theta - \theta_{SOC_i}}{\Delta\theta_i}\right)^{m_i+1}\right]} \quad (1)$$

Trong đó: θ - Góc quay trục khuỷu, (độ); θ_{SOCi} - Thời điểm bắt đầu cháy của từng giai đoạn, (độ); $\Delta\theta_i$ - Khoảng thời gian cháy của từng giai đoạn, (độ); a_i, m_i: Tham số mô hình tương ứng với từng giai đoạn cháy; i: Số hàm Wiebe.

Từ đó có thể xác định tốc độ cháy theo các nghiên cứu [6, 7, 8] như sau:

$$\frac{dx_{bi}}{d\theta} = \frac{a_i(m_i+1)}{\Delta\theta_i}\cdot\left(\frac{\theta-\theta_{SOC_i}}{\Delta\theta_i}\right)^{m_i}\cdot e^{\left[-a_i\left(\frac{\theta-\theta_{SOC_i}}{\Delta\theta_i}\right)^{m_i+1}\right]} \quad (2)$$

Tốc độ tỏa nhiệt theo góc quay trục khuỷu trong xylanh động cơ được xác định theo phương trình (3), [6, 7, 8]:

$$\frac{dQ_{hri}}{d\theta} = m_{inj_i}.x_{fi}.LHV.\frac{dx_{bi}}{d\theta}\ (J/độ) \quad (3)$$

Trong đó: m_{inj_i} - Lượng nhiên liệu tham gia cháy của giai đoạn thứ i, (kg); x_{fi} - Phần nhiên liệu đã cháy trong mỗi giai đoạn (%); LHV - Nhiệt trị thấp của nhiên liệu, (J/kg).

Vì vậy, tốc độ tỏa nhiệt trong xylanh có thể được tính toán theo phương trình sau:

$$\frac{dQ_{hr}}{d\theta} = \sum\frac{dQ_{hri}}{d\theta}\ (J/độ) \quad (4)$$

Theo [6, 7, 8] thì a_i và $\Delta\theta_i$ là hai thông số không phụ thuộc vào nhau. Do đó, một trong hai thông số trên có thể coi là hằng số. Theo các nghiên cứu [6, 7, 8], chọn a_i = 5 với cả hai quá trình cháy (cháy nhanh và cháy khuếch tán), chọn m = 1,4 với giai đoạn cháy nhanh, m = 0,65 với giai đoạn cháy khuếch tán.

Nhiệt lượng truyền cho xylanh được xác định theo công thức:

$$\frac{dQ_{hr}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma\text{-}1}.p.\frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma\text{-}1}.V.\frac{dp}{d\theta} + \frac{dQ_{ht}}{d\theta} + h_{in}.\frac{dm_{in}}{d\theta} -$$

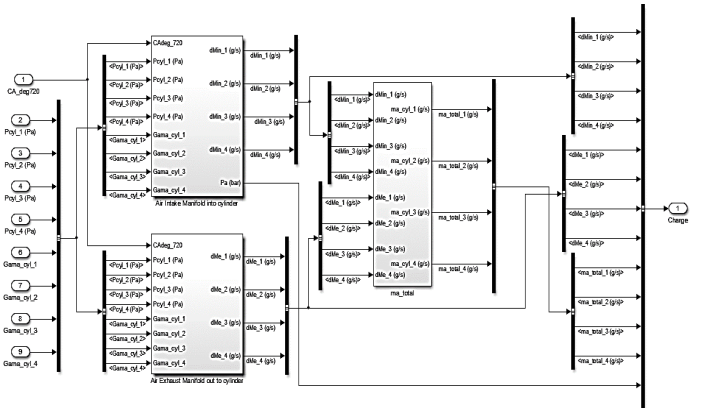
$$- h_{out}.\frac{dm_{out}}{d\theta} + C_v.T - u).dm + A.h_g(T - T_w)$$

Trong đó: dQ_{hr}/dt - Tốc độ tỏa nhiệt theo thời gian (J/s); dU/dt - Tốc độ biến thiên nội năng do nhiệt độ khí thay đổi (J/s); p - Áp suất xylanh (N/m^2); dV/dt - Tốc độ thay đổi thể tích công tác của xylanh (m^3/s); dQ_{ht}/dt - Tốc độ truyền nhiệt cho xylanh (J/s); h_{in} - Entanpi của khí nạp (J/kg); h_{out} - Entanpi của khí thải (J/kg); dm_{in}/dt - Tốc độ thay đổi lượng khí nạp (kg/s); dm_{out}/dt - Tốc độ thay đổi lượng khí thải (kg/s).

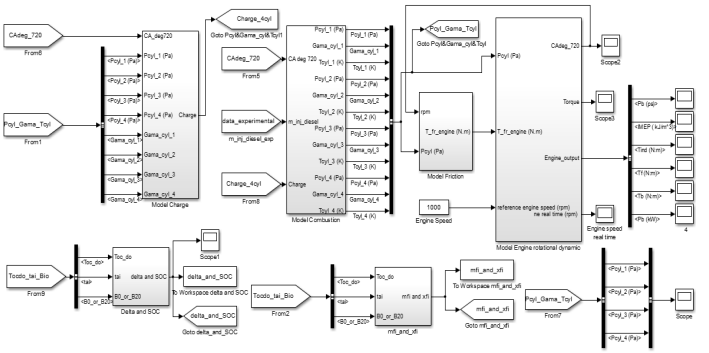
3. MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Trên cơ sở lý thuyết ở trên, nhóm tác giả đã xây dựng được mô hình động cơ diesel sử dụng hệ thống phun nhiên liệu common rail bằng phần mềm Matlab Simulink, cụ thể được trình bày trên hình 3 và hình 4. Mô hình bao gồm các khối: mô hình trao đổi khí, mô hình phun nhiên liệu, mô hình cháy, mô hình ma sát và mô hình động học mô men của động cơ. Các tham số của mô hình Wiebe: thời điểm bắt đầu cháy, khoảng thời gian cháy và tỷ lệ nhiên liệu tham gia cháy ở mỗi giai đoạn cháy được xác định bằng phương pháp tối ưu tham số Check against reference trong Simulink với điều kiện diễn biến áp suất xylanh từ mô hình luôn được so với áp suất xylanh thực nghiệm, cho đến khi công cụ tối ưu xác định được các tham số của mô hình cháy đảm bảo áp suất xylanh giữa mô hình và thực nghiệm có sai số nhỏ nhất.

Áp suất xylanh và tốc độ tỏa nhiệt ở các chế độ tải 25%, 50%, 75% và 100% được trình bày trên hình 5 đến hình 12.



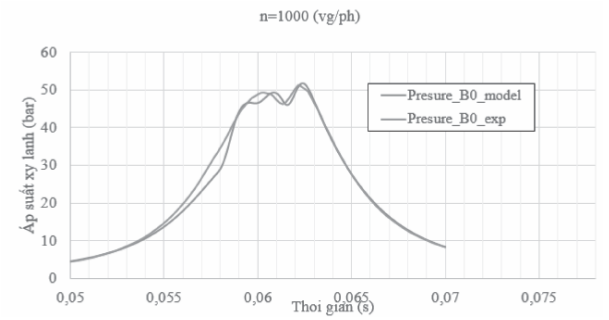
Hình 3. Mô hình động học đường nạp thải



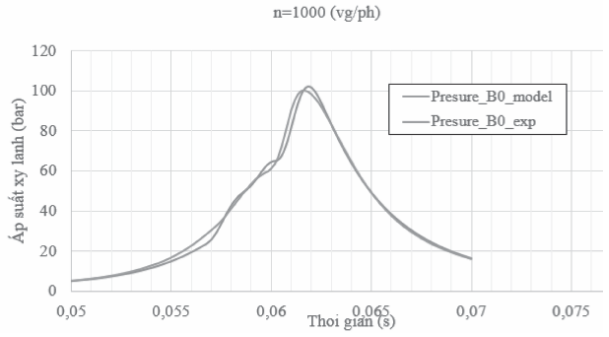
Hình 4. Mô hình động cơ sử dụng diesel và biodiesel làm việc theo thời gian thực

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

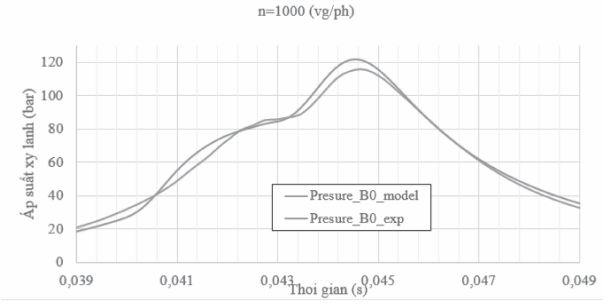
Từ mô hình cháy xác định được diễn biến áp suất trong xylanh động cơ, đồng thời so sánh với dữ liệu áp suất đo được bằng thực nghiệm động cơ trên băng thử. Kết quả cho thấy diễn biến áp suất trong xylanh giữa mô hình và thực nghiệm đảm bảo chính xác. Do đó có thể sử dụng mô hình để tính toán tốc độ tỏa nhiệt, nhiệt lượng tỏa ra của nhiên liệu ở các chế độ tải khác nhau.



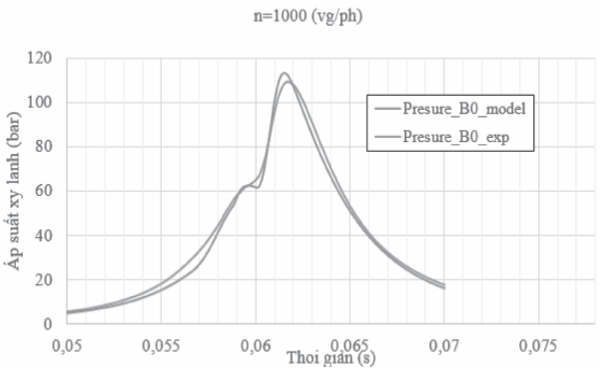
Hình 5. So sánh áp suất xylanh của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 25% tải



Hình 6. So sánh áp suất xylanh của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 50% tải

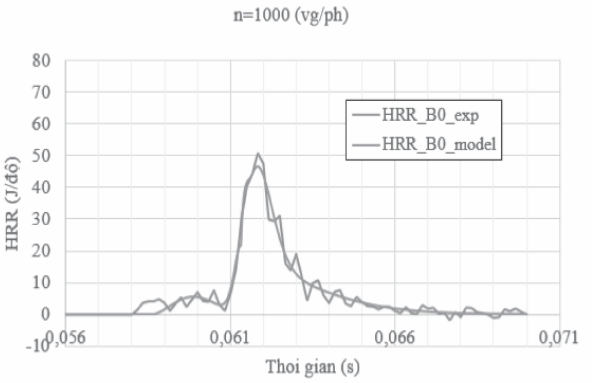


Hình 7. So sánh áp suất xylanh của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 75% tải

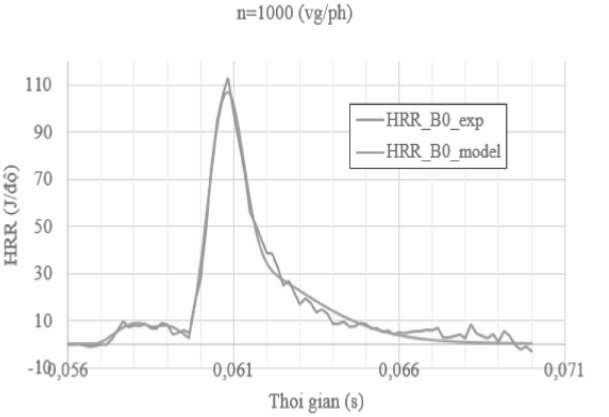


Hình 8. So sánh áp suất xylanh của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 100% tải

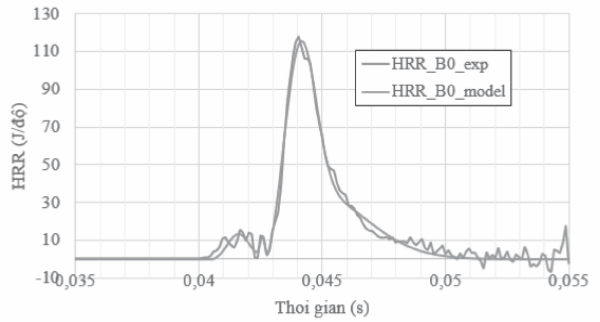
Pressure_B0_model: Áp suất xylanh của mô hình mô phỏng;Pressure_B0_exp: Áp suất xylanh thực nghiệm



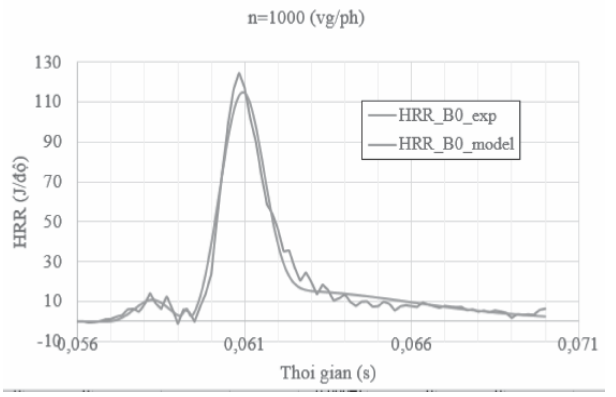
Hình 9. So sánh tốc độ tỏa nhiệt của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 25% tải



Hình 10. So sánh tốc độ tỏa nhiệt của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 50% tải ☞



Hình 11. So sánh tốc độ tỏa nhiệt của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 75% tải



Hình 12. So sánh tốc độ tỏa nhiệt của mô hình mô phỏng và thực nghiệm tại tốc độ 1000 vg/ph, 100% tải
HRR_B0_model: Tốc độ tỏa nhiệt của mô hình mô phỏng; HRR_B0_exp: Tốc độ tỏa nhiệt thực nghiệm

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng mô hình mô phỏng quá trình cháy của động cơ diesel dùng hệ thống phun kiểu common rail khi sử dụng biodiesel. Từ các kết quả phân tích ở trên cho thấy mô hình cháy đảm bảo chính xác, có thể sử dụng mô hình để phân tích tốc độ cháy, tốc độ tỏa nhiệt, xác định thời điểm bắt đầu cháy, khoảng thời gian cháy, áp suất xylanh, đồng thời là cơ sở để xây dựng mô hình điều khiển động cơ diesel dùng hệ thống phun kiểu common rail. Kết quả tại các tốc độ khác cũng có quy luật tương đồng, tuy nhiên do giới hạn của bài báo nên nhóm tác giả sẽ đề cập tới trong các nghiên cứu tiếp theo.❖

Ngày nhận bài: **03/5/2025**
Ngày phản biện: **21/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Khổng Văn Nguyên, Lê Anh Vũ, Trần Văn Thoan, Trần Anh Trung, Nguyễn Hoàng Vũ (2019), "*Nghiên cứu xây dựng mô hình cháy động cơ diesel Common rail khi sử dụng diesel và biodiesel với một lần phun chính*". Tạp chí Giao thông vận tải (ISSN: 2354-0818), số tháng 9/2019, tr. 117-120.

[2]. Nguyễn Hoàng Vũ, "*Nhiên liệu dùng cho động cơ đốt trong*". NXB. Quân đội Nhân dân, 2010.

[3]. Nguyen Khong Van, Trung Tran Anh, Vu Nguyen Hoang, Van Nguyen Cao (2017), "*Combustion modeling of a CommonRail multi-injection diesel engine fuelled with diesel and biodiesel*". IEEE Xplore - International Conference of Systems Science and Engineering (ICSSE 2017), ISSN 2325-0925, 11 September 2017, pp. 387-392.

[4]. Vu H. Nguyen, Phuong X. Pham; Biodiesels, "*Oxidizing enhancers to improve CI engine performance and emission quality*". ScienceDirect, Fuel; Fuel-154 (2015), Pages 293-300.

[5]. Fadila Maroteaux and Charbel Saad, "*Diesel engine combustion modeling for hardware in the loop applications: Effects of ignition delay time model*". Energy 57 (2013), pp. 641-652.

[6]. Usman Asad and Ming Zheng, "*Real-time Heat Release Analysis for Model-based Control of Diesel Combustion*". SAE Technical Paper, 2008-01-1000.

[7]. Charbel Saad, Fadila maroteaux, Jean-Baptiste Millet and Fabrice Aubertin, "*Combustion Modeling of a Direct Injection Diesel Engine Using Double Wiebe Functions: Application to HiL Real-Time Simulations*". SAE Technical Paper 2011-24-0143, 09/11/2011, doi:10.4271/2011-24-0143.

[8]. M. Rajkumar, "*Heat Release Analysis and Modeling for a Common-Rail Diesel Engine*". Master's Tesis, University of Tennessee, 2002.

[9]. Carlos Adolfo Finol Parra (2008), "*Heat transfer investigations in a modern diesel engine*". Department of Mechanical Engineering University of Bath.

[10]. Khổng Văn Nguyên, Trần Văn Thoan, Đồng Minh Tuấn, Lê Anh Vũ (2022), "*Ứng dụng máy tính trong thiết kế và tính toán ô tô*". NXB. Khoa học và Kỹ Thuật.

[11]. http://www.mathworks.com/products/stateflow/, truy cập ngày 18/04/2025.

[12]. W. Zhuang, X. Zhang, D. Zhao, H. Peng, L. Wang (2016), "*Optimal design of three-planetary-gear power-split hybrid powertrains*". International Journal of Automotive Technology, vol. 17, no. 2, pp. 299-309.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LỖ TRÍCH KHÍ ĐẾN HOẠT ĐỘNG CỦA MÁY TỰ ĐỘNG TRÊN SÚNG TRƯỜNG STR406

STUDY ON THE EFFECT OF THE GAS PORT ON THE OPERATION OF THE AUTOMATIC MECHANISM IN THE STR406 RIFLE

ThS. **Vũ Huy Khôi**, ThS. **Mai Văn An**, ThS. **Tạ Bá Dũng**
Viện Vũ khí, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

TÓM TẮT

Súng trường STR406 được thiết kế theo nguyên lý trích khí, piston lùi ngắn, khóa nòng xoay. Trong đó, piston không liên kết cứng với khóa nòng, dưới tác dụng của áp suất khí thuốc trong buồng khí đẩy piston cùng khóa nòng về sau trong một khoảng nhất định, sau đó piston dừng lại, khóa nòng tiếp tục chuyển động về sau. Nghiên cứu này trình bày về ảnh hưởng của thông số đường kính lỗ trích khí đến áp suất khí thuốc trong buồng khí qua đó ảnh hưởng đến hoạt động của máy tự động. Kết quả nghiên cứu giúp cho công tác xây dựng tài liệu thiết kế được chính xác hơn, giảm thời gian trong thử nghiệm.

Từ khóa: *Súng trường; Động lực học; Lỗ trích khí.*

ABSTRACT

The STR406 rifle is designed based on the gas-operated principle, utilizing a short-stroke piston and rotating bolt mechanism. In this configuration, the piston is not rigidly connected to the bolt. Under the influence of propellant gas pressure in the gas chamber, both the piston and bolt move rearward together for a certain distance; afterward, the piston stops while the bolt continues its rearward travel independently. This study examines how variations in the gas port diameter affect the propellant gas pressure within the gas chamber, thereby influencing the operation of the automatic mechanism. The research results facilitate more accurate design documentation and reduce testing duration.

Keywords: *Submachine gun; Dynamic; Gas port.*

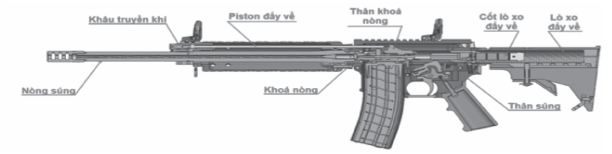
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Súng trường STR406 là loại súng trang bị cho cá nhân dùng để tiêu diệt sinh lực địch trong cự ly 200m trở lại. Súng dùng đạn 5,56x45mm NATO, có hai chế độ bắn, phát một và liên thanh. Súng hoạt động theo nguyên lý trích khí, piston lùi ngắn, khóa nòng xoay. Khi bắn, cụm khóa nòng là khâu cơ sở nhận năng lượng từ áp suất khí thuốc qua piston truyền chuyển động cho toàn bộ cơ cấu của súng hoạt động. Như vậy, các thông số ảnh hưởng đến áp suất trong buồng khí cần phải được khảo sát kỹ lưỡng. Trong đó, thông số đường kính lỗ trích khí là thông số quan trọng nhất.

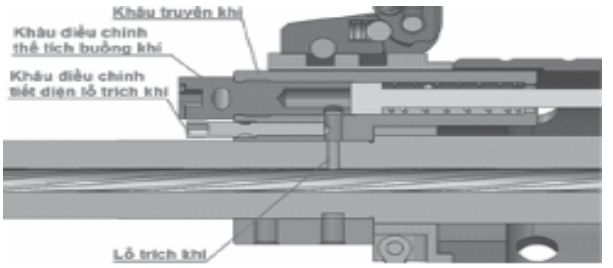
☞

2. TÍNH TOÁN KHẢO SÁT LỖ TRÍCH KHÍ

2.1. Cấu tạo máy tự động súng trường STR406



Hình 1. Cấu tạo máy tự động súng trường STR406



Hình 2. Cấu tạo bộ phận trích khí súng trường STR406

Súng STR406 (hình 1) bao gồm các bộ phận chính: Nòng súng, Thân súng, Cụm khóa nòng (Thân khóa nòng, Khóa nòng), Cụm lò xo đẩy về (Cốt lò xo đẩy về, Lò xo đẩy về), Khâu truyền khí, Piston đẩy về…. Đối với súng hoạt động theo nguyên lý trích khí, bài toán nhiệt động buồng khí là thành phần quan trọng khi xây dựng bài toán động lực học máy tự động. Đây là bài toán phức tạp liên quan đến nhiều thông số về kết cấu và thông số của khí thuốc. Vì súng bắn đạn tiêu chuẩn 5,56x45mm NATO nên có thể coi các thông số về khí thuốc là ổn định trong quá trình bắn. Để khảo sát thông số lỗ trích khí, ta cũng giả thiết rằng máy tự động của súng đã hoạt động đúng quy luật.

Việc tính toán, khảo sát các thông số lỗ trích khí được kết hợp với giải bài toán động lực học máy tự động nhằm đánh giá ảnh hưởng của sự thay đổi áp suất khí thuốc trong buồng khí đến hoạt động của khâu cơ sở.

2.2. Bài toán áp suất buồng khí và động lực học máy tự động

Trên cơ sở các giả thiết cơ bản, kết hợp với kết cấu thực tế của súng và đạn, xây dựng hệ phương trình giải bài toán áp suất buồng khí và động lực học của súng như sau [1], [2]

$$
\begin{cases}
\dfrac{dv}{dt} = \xi_1\xi_2\dfrac{p.S}{\varphi.m} \\
\dfrac{dl}{dt} = \xi_1\xi_3.v \\
\dfrac{dz}{dt} = \xi_2\dfrac{p}{I_k} \\
\dfrac{d\omega_c}{dt} = \xi_2\chi.\omega\left(1+2\lambda z\right)\dfrac{p}{I_k} - \sum_{i=1}^{n}\xi_i G_{bi} - \left(1-\xi_3\right)G_d \\
\dfrac{dw}{dt} = \xi_2\dfrac{1-\alpha\delta}{\delta}\chi.\omega\left(1+2\lambda z\right)\dfrac{p}{I_k} + \xi_3 sv \\
\dfrac{dp}{dt} = \dfrac{1}{w}\left\{\left[\xi_2\dfrac{p\chi.\omega}{I_k}\left(f - Kp\dfrac{1-\alpha\delta}{\delta}\right)\left(1+2\lambda z\right) - \xi_3 KpSv\right] - K_p\left[\sum_{i=1}^{n}\xi_i G_{bi} + \left(1-\xi_3\right)G_d\right] - K_t p\right. \\
\dfrac{dX}{dt} = V_{Kh} \\
\dfrac{dV}{dt} = \dfrac{\xi_4 pS - \xi_5\Pi - \xi_6 R_V - \xi_7 P_b}{M_{Kh}}
\end{cases}
\qquad (1.1)
$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

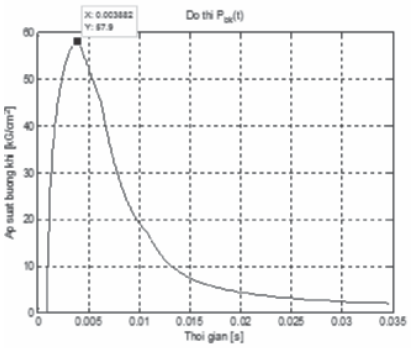
Sử dụng phương pháp tích phân số trên phần mềm MATLAB 2011b giải hệ phương trình (1.1). Với các thông số đầu vào của đạn 5,56x45mm NATO, thông số kết cấu của súng trường STR406 và tham khảo [1], [2], ta thu được các kết quả như sau:

Bảng 1. Các thông số cơ bản tính toán áp suất buồng khí và động lực học máy tự động

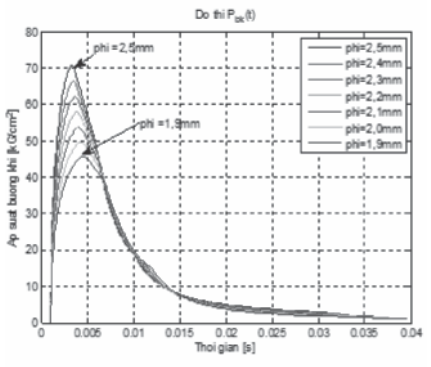
TT	Tên thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Chiều dài nòng súng	L_0	dm	4,06
2	Chiều khương tuyến	L_{kt}	dm	3,632
3	Khối lượng của cụm khóa nòng	m_{KN}	kg	0,441
4	Khối lượng của lò xo đẩy về	m_{lxdv}	kg	0,001
5	Khối lượng của vỏ đạn	$m_{VĐ}$	kg	$7,14.10^{-3}$
6	Khối lượng của viên đạn	$m_Đ$	kg	0,012
7	Độ cứng của lò xo đẩy về	$C_{ĐV}$	kG/m	4,5
8	Lực nén sơ bộ của lò xo đẩy về	$\Pi_{ĐV0}$	kG	4,45
9	Lực tách viên đạn ra khỏi hộp tiếp đạn	F_b	kG	1,35
10	Diện tích bề mặt trong ban đầu của buồng đạn	F_{bm}	dm^2	0,06
11	Hệ số ma sát giữa vỏ đạn và thành buồng đạn	K_{ms}	-	0,15
12	Hệ số tăng nặng của đầu đạn	φ	-	1,16
13	Đường kính lỗ trích khí	ϕ	dm	0,022
14	Vị trí lỗ trích khí đến đầu khương tuyến	L_ϕ	dm	2,707
15	Thể tích ban đầu của buồng khí	W_{bk}	dm^3	0,1674

3.1. Kết quả giải bài toán áp suất buồng khí

Tiến hành tính toán với diện tích lỗ trích khí ban đầu của súng ϕ = 2,2mm. Sau đó, ta thay đổi giá trị của ϕ một lượng (0,1mm) tương đương với các giá trị dung sai khi chế tạo và chiều dày lớp muội thuốc có thể bám trên bề mặt lỗ. ☞



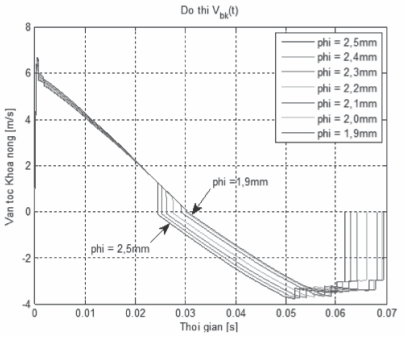
Hình 3. Đồ thị biến thiên áp suất buồng khí khi diện tích lỗ trích khí ϕ = 2,2 mm



Hình 4. Đồ thị biến thiên áp suất buồng khí khi thay đổi diện tích lỗ trích khí

3.2. Tính toán vận tốc khóa nòng khi thay đổi diện tích lỗ trích khí

Tính toán vận tốc khóa nòng khi thay đổi diện tích lỗ trích khí tương ứng với bài toán áp suất buồng khí nhận được đồ thị như hình 5.



Hình 5. Đồ thị vận tốc của cụm khóa nòng khi thay đổi diện tích lỗ trích khí

Nhận xét kết quả tính toán:

Kết quả tính toán cho thấy quy luật ảnh hưởng của diện tích lỗ trích khí đến áp suất khí thuốc trong buồng khí và vận tốc khóa. Khi diện tích lỗ trích khí giảm xuống 1,9mm thì khóa nòng không còn va chạm sau cùng (vận tốc V_{sc} = 0 m/s). Nếu diện tích lỗ trích khí nhỏ hơn giá trị này thì hành trình của khóa nòng sẽ không đảm bảo cho máy tự động của súng hoạt động đúng chức năng. Để đảm bảo máy tự động hoạt động được, diện tích lỗ trích khí cần lớn hơn 1,9mm.

4. KẾT LUẬN

Qua các kết quả tính toán bài toán nhiệt động buồng khí và động lực học máy tự động ở trên có thể khẳng định các thông số kết cấu lỗ trích khí của súng là hợp lý. Bài toán này có thể làm cơ sở cho việc nghiên cứu khảo sát thay đổi diện tích lỗ trích khí của súng phù hợp với quá trình sản xuất cũng như phù hợp với điều kiện con người và khí hậu nước ta. ❖

Ngày nhận bài: **10/3/2025**
Ngày phản biện: **24/3/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Ngọc Du, Đỗ Văn Thọ, "*Thuật phóng trong của súng pháo*". Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 1976.

[2]. Phạm Huy Chương, "*Động lực học vũ khí tự động*". Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 2002.

TỐI ƯU HÓA CẤU TRÚC CỦA CÁNH TAY ROBOT NĂM BẬC TỰ DO BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG PHÂN TÍCH

OPTIMIZING THE STRUCTURE OF A FIVE-DEGREE-OF-FREE ROBOT ARM BY ANALYTICAL SIMULATION METHOD

KS. **Đỗ Văn Tỉnh***, ThS. **Nguyễn Tuấn Hưng**
Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
**Email: dvtinh@uneti.edu.vn*

TÓM TẮT

Robot công nghiệp, đặc biệt trong ngành hàn tự động chiếm đến 70%, đang được ứng dụng rộng rãi trong các dây chuyền sản xuất tại Việt Nam. Để nâng cao năng suất và hiệu quả gia công, các thông số như phạm vi thao tác, độ cứng, trọng lượng cần được tối ưu hóa. Bài báo sử dụng robot hàn làm đối tượng nghiên cứu, áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích kết cấu, cho thấy việc tích hợp CAE giúp giảm đáng kể khối lượng cánh tay robot.

Từ khóa: *CAE; Robot; Độ cứng; Cường độ làm việc; Tối ưu hóa kết cấu.*

ABSTRACT

Industrial robots, particularly in automated welding where they account for up to 70%, are widely applied in production lines in Vietnam. To improve productivity and machining efficiency, parameters such as working range, stiffness, and weight need to be optimized. This paper focuses on a welding robot as the research subject, applying the finite element method to analyze its structure, and demonstrates that integrating CAE significantly reduces the weight of the robot arm.

Keywords: *Computer-Aided Engineering; Robotics; Stiffness; Work intensity; Structural optimization.*

1. GIỚI THIỆU

Robot công nghiệp là loại robot phổ biến trong các ngành công nghiệp và có tiềm năng phát triển mạnh mẽ nếu quy trình thiết kế được cải tiến. Cải tiến này không chỉ tăng hiệu quả và độ tin cậy mà còn giảm chi phí và thời gian sản xuất [1]. Nghiên cứu trong nước tập trung vào tối ưu hóa thiết kế robot, sử dụng phần mềm Abaqus để mô phỏng tĩnh học, động học và tối ưu hóa kết cấu, giúp phát hiện các vấn đề từ sớm và giảm thiểu sai sót trong quá trình thiết kế [2].

Các nghiên cứu quốc tế đã phát triển các phương pháp tiên tiến hơn, ứng dụng phần mềm NX 3D trong mô hình hóa và phân tích động học, từ đó tối ưu hóa quá trình thiết kế và sản xuất [4]. Sự tích hợp các công cụ thiết kế, mô phỏng và gia công cơ khí giúp giảm thiểu thời gian và chi phí trong toàn bộ quy trình. Các nghiên cứu này cũng đặc biệt chú trọng ☞

đến việc xác định các thông số như mô-men, khối lượng và điều kiện biên, từ đó tối ưu hóa chuyển động của robot [3].

Nghiên cứu này tập trung vào tính ổn định tĩnh của cánh tay robot, đặc biệt là các khớp nối và bộ phận chuyển động. Bằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA), nghiên cứu giúp tối ưu hóa thiết kế trong điều kiện tải trọng thực tế, đánh giá độ bền và độ cứng của robot. Phần mềm Abaqus được sử dụng để phân tích tĩnh học và động học, giúp cải thiện tính ổn định và hiệu quả thiết kế [2]. Quá trình thiết kế robot được thể hiện như hình 1 dưới đây.



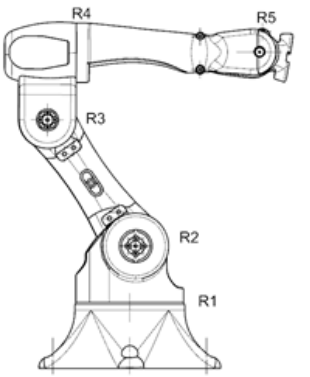
Hình 1. Các bước thiết kế cánh tay robot hoàn chỉnh.

2. TỐI ƯU HÓA CÁNH TAY ROBOT

Thiết kế kết cấu phải đáp ứng một số tiêu chí được thiết lập liên quan đến thiết kế kích thước, hình dạng, mức độ sử dụng vật liệu phải thích ứng với các yêu cầu, chức năng [1]. Việc tối ưu hóa này dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn để cải thiện hiệu suất tĩnh và động của cấu trúc robot công nghiệp [2].

2.1. Tối ưu hóa cấu trúc

Tối ưu hóa cấu trúc bằng phương pháp FEM cho robot được sử dụng cùng với các kỹ thuật tối ưu hóa hình dạng [2]. Bằng cách sử dụng phương pháp này, có thể xác định được thiết kế cấu trúc liên kết tốt nhất của cánh tay robot [1]. Nghiên cứu được thực hiện trên cấu hình robot năm bậc tự do bao gồm các chuyển động quay của các khâu như thể hiện trong hình 2 [3].



Hình 2. Các khâu chuyển động của robot.

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn

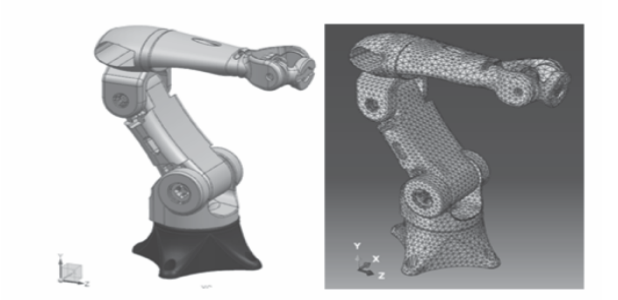
Việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trong thiết kế robot công nghiệp đang là xu hướng trong tương lai vì nó giúp giảm chi phí sản xuất, chi phí thiết kế, tiết kiệm thời gian, cải thiện độ bền của cấu trúc bằng cách nhận ra điểm yếu, từ đó cải thiện chất lượng thiết kế robot [2]. Việc chế tạo robot tập trung vào hai hướng nghiên cứu trong phần cơ khí. Đó là quá trình thay thế những vật liệu, chi tiết đã lỗi thời, có tính chất cơ lý kém thông qua việc nghiên cứu và phát triển những vật liệu mới [1].

Động lực học robot bị chi phối bởi tỉ lệ độ cứng/trọng lượng chi tiết. Điều này được chứng minh bằng cách sử dụng các vật liệu như hợp kim nhôm hoặc vật liệu tổng hợp có trọng lượng nhẹ [3]. Vật liệu composite ngày càng phát triển để thay thế các chi tiết máy ở một mức độ nào đó đảm bảo được tính chất và yêu cầu kỹ thuật về cơ tính [4]. Trong quá trình tối ưu hóa, không có phương pháp tối ưu hóa nào cụ thể có thể đáp ứng được tất cả các yêu cầu, chức năng. Để cải thiện trạng thái tĩnh và động của cấu trúc robot công nghiệp, phải thực hiện các phương pháp tối ưu cụ thể như [2]:

• Tối ưu hóa khối lượng cấu trúc.
• Tối ưu hóa độ cứng tĩnh của cấu trúc.
• Chuyển vị tối thiểu để đảm bảo độ chính xác tối đa cho khâu cuối.
• Tần số cộng hưởng cao nhất nằm ngoài dải tần số môi trường.

3. MÔ HÌNH HÓA VÀ PHÂN TÍCH TĨNH ROBOT

Bước đầu tiên của FEA là xây dựng mô hình hóa cho cấu trúc robot năm bậc tự do. Để thực hiện phân tích tĩnh, phần mềm Abaqus được sử dụng để phân tích FEM. Cấu hình cơ học được mô hình hóa và chia lưới được thể hiện trong hình 3 dưới đây.



Hình 3. Mô hình hóa và mô hình chia lưới của robot năm bậc tự do.

Để thu được kết quả phân tích phần tử hữu hạn của phân tích tĩnh cánh tay robot, các tham số sau được coi là điều kiện biên để đưa vào phần mềm tính toán như tải trọng phân bố theo cả ba hướng (Ox, Oy, Oz) là 490N tại vị trí khâu cuối. Nhiệt độ mô phỏng coi như nhiệt độ phòng 25°C. Cấu trúc được kiểm tra bằng phần mềm Abaqus để phân tích tĩnh nhằm thu được chuyển vị tổng cộng và hướng của ứng suất chính và ứng suất tương đương gây ra do việc áp dụng các điều kiện tải trọng.

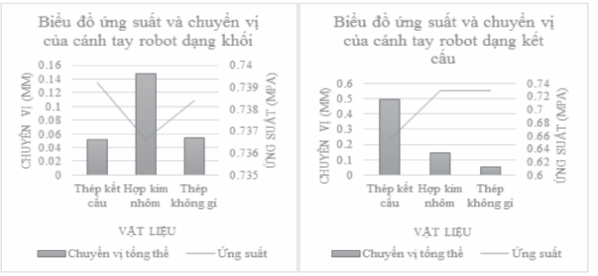
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bộ điều khiển robot với năm bậc tự do đã được phân tích tĩnh bằng phần mềm FEA để thu được tổng lượng chuyển vị và ứng suất chính, ứng suất tương đương ở điều kiện tải trọng không đổi với ba loại vật liệu khác nhau được sử dụng để mô phỏng bao gồm thép kết cấu, hợp kim nhôm và thép không gỉ. Các tính chất của ba loại vật liệu khác nhau của cánh tay robot được thể hiện trong bảng 1 dưới đây.

Bảng 1. Tính chất vật liệu sử dụng mô phỏng.

Tính chất	Khối lượng riêng (Kg/m^3)	Mức độ dãn nở nhiệt (µm/m-K)	Nhiệt dung riêng (kJ/kg-K)	Độ dẫn nhiệt (W/m-K)	Modul đàn hồi (Gpa)	Hằng số Poisson's	Module cắt (Gpa)	Độ bền kéo (Mpa)
Thép kết cấu	7800	11	0.48	50	200	0.26	79.3	510
Hợp kim nhôm	2700	31	0.896	167	68.9	0.33	26	310
Thép không gỉ	8000	9.6	0.5	16.2	193	0.29	72	505

Các quy trình và bước tối ưu hóa phụ thuộc vào các tham số cần cải thiện, thiết lập các tham số cho phân tích FEA. Việc phân tích các thông số quan trọng như chuyển vị và ứng suất phải được xem xét để tối ưu hóa mô hình cánh tay robot có thể bằng kinh nghiệm hoặc kỹ thuật phần mềm. Hình 4 dưới đây thể hiện ứng suất và chuyển vị của cánh tay robot trước quá trình tối ưu hóa và sau quá trình đã tối ưu hóa cấu trúc.



Hình 4. Biểu đồ ứng suất và chuyển vị của cánh tay robot trước và sau quá trình tối ưu hóa.

Có thể thấy rằng, trước quá trình tối ưu hóa, cánh tay robot ở dạng khối, vật liệu thép kết cấu và thép không gỉ có cơ tính cao và ứng suất lớn, nhưng chuyển vị nhỏ, ngược lại vật liệu hợp kim nhôm có cơ tính thấp hơn thép nên cho lượng chuyển vị lớn hơn, đồng thời ứng suất nhỏ hơn. Điều này chưa thực sự tối ưu hóa về mặt khối lượng, vật liệu của cánh tay robot năm bậc tự do khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh. Qua quá trình tối ưu hóa cấu trúc cánh tay robot, có thể thấy rằng khi vật liệu chịu ứng suất tương đối thì cho dạng chuyển vị nhỏ hơn, phù hợp hơn. Qua đó có thể thấy rằng khả năng tối ưu hóa cấu trúc giúp giảm mức độ sử dụng vật liệu, tối ưu hóa quá trình gia công, vận chuyển, đồng thời tối ưu hóa khả năng chịu tải của robot. Các kết luận quan trọng được chỉ ra là:

1) Việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn hiện nay là cần thiết và phổ biến với mục đích giảm trọng lượng kết cấu của robot, giảm thiểu biến dạng kết cấu, nâng cao độ ổn định cơ học, giảm tự trọng trên cơ sở áp dụng điều kiện thí nghiệm tải tĩnh.

2) Dạng cấu trúc đã được tối ưu hóa được lựa chọn từ hình dạng, trọng lượng, trạng thái chịu tải trọng tĩnh tốt hơn. Chứng tỏ đây là phương pháp phân tích dựa trên tiêu chí về độ cứng và khối lượng. Các giá trị biến dạng và ứng suất thu được thấp hơn khi so sánh với thiết kế dạng khối ban đầu của cánh tay robot mà không tối ưu hóa hình dạng.

3) Tối ưu hóa cấu trúc có sự hỗ trợ của phần mềm FEM có thể tối ưu hóa nhiều loại vật liệu khác nhau cho cùng một dạng chi tiết, cơ cấu mà tối ưu hóa về mặt thời gian, từ đó lựa chọn chính xác và tối ưu vật liệu sử dụng trong thực tiễn.

4) Đây là phương pháp không còn mới nhưng có ý nghĩa khoa học lớn giúp các nhà nghiên cứu mở rộng hơn về phạm vi, quy mô nghiên cứu, tiết kiệm chi phí xã hội.

Ngày nhận bài: **22/4/2025**
Ngày phản biện: **12/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Choong W. H, Yeo K. B, "*Structural Design for a 3DOF Robot Lower-Arm via Computer Aided Engineering*". The Journal of Science and Technology, 20 (2007).

[2]. Garcia, E., Jimenez, M.A., De Santos, P.G., Armada, M, "*The Evolution of Robotics Research*". IEEE Robot. Autom. Mag. 14(1), (2007), 90-103.

[3]. Park, K., Kim, Y.S., Kim, C.S. & Park, H.J., "*Integrated application of CAD/CAM/CAE and RP for rapid development of a humanoid biped robot*". Journal of Materials Processing Technology, 609-6.13 (2007), 187-188.

[4]. Zhang D, Zhen G, "*Performance Analysis and Optimization of a Five-Degrees-of-Freedom Compliant Hybrid Parallel Micromanipulator*". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, 34: (2015), 20-29.

XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG LÁ NHÍP Ô TÔ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

BUILDING AND SIMULATION MODELS LEAF SPRING BY FINITE ELEMENT METHOD

ThS. **Lê Huỳnh Đức***, ThS. **Vũ Văn Thi**, ThS. **Nguyễn Tuấn Hưng**
Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
**Email: lhduc@uneti.edu.vn*

TÓM TẮT

Nhíp lá (lò xo lá) là một bộ phận được sử dụng rộng rãi trong hệ thống treo ô tô, bên cạnh lò xo xoắn và bóng hơi. Chức năng chính của các loại hệ thống treo là hấp thụ chấn động và giảm rung. Dù có nhiều loại lò xo khác nhau, nhíp lá vẫn đóng vai trò quan trọng, đặc biệt trong xe tải. Nghiên cứu này tập trung tính toán ứng suất và tần số dao động của nhíp lá đơn, được mô hình hóa với hai loại vật liệu: thép và composite. Kết quả cho thấy nhíp bằng vật liệu composite chịu ứng suất thấp hơn và nhẹ hơn so với thép, giúp giảm trọng lượng xe, tiết kiệm nhiên liệu và tăng tuổi thọ các chi tiết máy.

Từ khóa: *Nhíp lá; Vật liệu composite; Ứng suất; Tần số.*

ABSTRACT

Leaf springs are a widely used component in automobile suspension systems, along with coil springs and air springs. The main function of suspension systems is to absorb shock and reduce vibration. Although there are many different types of springs, leaf springs still play an important role, especially in trucks. This study focuses on calculating the stress and oscillation frequency of single leaf springs, modeled with two materials: steel and composite. The results show that composite springs are less stressed and lighter than steel, which helps reduce vehicle weight, save fuel and increase the life of machine parts.

Keywords: *Leaf springs; Composite materials; Stress; Frequency.*

1. GIỚI THIỆU

Nhíp lá là loại lò xo đàn hồi, dùng phổ biến trong hệ thống treo sau của xe tải và xe thương mại để hấp thụ chấn động và giảm rung động [1]. Cấu tạo gồm nhiều lá nhíp, trong đó lá chính gắn với khung xe và các lá chia độ liên kết bằng đai thép [2]. Một đầu bộ nhíp cố định, đầu còn lại gắn tùy động để đảm bảo linh hoạt [2]. Mắt nhíp thường dùng ống lót cao su để giảm ma sát và dễ thay thế [1]. Ma sát giữa các lá nhíp có thể gây mài mòn, giảm độ bền và phát sinh tiếng ồn, do đó các biện pháp như sơn chống ma sát, chèn cao su hoặc bọc kín nhíp được áp dụng để cải thiện hiệu suất làm việc [2]. ☞

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã phân tích ảnh hưởng của ma sát và vật liệu đến độ bền của nhíp lá, như nghiên cứu của Rao et al. (2017) đánh giá mô hình ứng suất và tuổi thọ nhíp composite [3]. Trong nước, các đề tài tại Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh và Trường Đại học Giao thông Vận tải cũng đã mô phỏng ứng suất, biến dạng và đánh giá giải pháp bọc nhíp nhằm tăng tuổi thọ [4]. Kết quả đều cho thấy việc sử dụng vật liệu nhẹ như composite và các biện pháp bôi trơn hoặc giảm ma sát là hướng đi hiệu quả trong thiết kế hiện đại [1, 3].

Nghiên cứu tập trung vào ứng xử cơ học của nhíp lá sử dụng trong hệ thống treo sau của ô tô tải. Mục tiêu chính là đánh giá ứng suất, tần số dao động và độ bền mỏi của nhíp lá khi làm việc trong điều kiện tải trọng thực tế, đồng thời so sánh giữa hai loại vật liệu: thép truyền thống và composite [4]. Nhằm tăng hiệu quả làm việc và giảm khối lượng xe, nghiên cứu đề xuất thay thế vật liệu thép bằng composite nhằm cải thiện độ bền, giảm tiêu hao nhiên liệu và tăng tuổi thọ chi tiết [3, 4].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tính toán phân tích

Bằng phương pháp tính toán phân tích, với tải trọng 1000N, chuyển vị và ứng suất uốn của lá nhíp được tính toán như sau:

• Chuyển vị:

$$\delta = \frac{4F.L^3}{E.b.t^3} = 22{,}34\ (mm)$$

• Ứng suất uốn:

$$\frac{6F.L}{b.t^2} = 309{,}91\ (N/mm^2)$$

2.2. Vật liệu composite

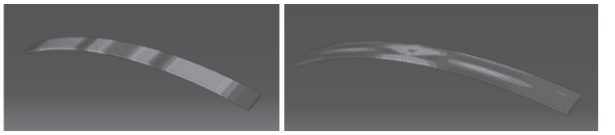
Vật liệu tổng hợp composite là loại vật liệu được cấu thành từ hai hay nhiều loại vật liệu có tính chất vật lý hóa học khác nhau đáng kể mà khi kết hợp lại tạo thành vật liệu có đặc tính khác với các thành phần vật liệu cấu thành [1]. Vật liệu được cấu thành có những đặc tính, tính chất đặc biệt ví dụ như mạnh hơn, nhẹ hơn, rẻ hơn,… khi so sánh với vật liệu truyền thống [2]. Dưới đây là các thông số vật liệu cơ bản của hai loại vật liệu composite được sử dụng trong công nghiệp [3].

Bảng 1. Thông số vật liệu của cacbon epoxy và thuỷ tinh epoxy

Tính chất cơ học	Đơn vị	Cacbon Epoxy	Thủy tinh Epoxy
Mô-đun đàn hồi	GPa	131,6	43,3
Mô-đun cắt	GPa	3,5	3,5
Hệ số Poisson's		0,28	0,3
Khối lượng riêng	Kg/m^3	1550	2100
Ứng suất cắt	MPa	40	65

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Với tải trọng 1000N đặt vào lá nhíp, ta có mô hình chuyển vị và ứng suất của lá nhíp được thể hiện như hình 1 dưới đây:



Hình 1. Mô phỏng chuyển vị và ứng suất của lá nhíp

Kết quả so sánh giữa hai phương pháp mô phỏng phân tích và tính toán phân tích được thể hiện trong bảng 2 dưới đây:

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Bảng 2. So sánh giữa hai phương pháp tính toán phân tích và mô phỏng phân tích bằng phân tích phần tử hữu hạn.

Thông số	Tính toán phân tích	Phân tích phần tử hữu hạn	Độ sai khác
Chuyển vị (mm)	22,34	26,13	14,51 %
Ứng suất uốn (N/mm²)	309,91	247,05	20,29 %

Bảng so sánh giữa kết quả tính toán phân tích lý thuyết và phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) cho thấy có sự sai khác nhất định. Về chuyển vị, FEM cho giá trị 26,13 mm, cao hơn so với tính toán lý thuyết là 22,34 mm, với độ sai khác khoảng 14,51%. Về ứng suất uốn, kết quả từ FEM là 247,05 N/mm², thấp hơn so với lý thuyết (309,91 N/mm²), với độ sai khác khoảng 20,29%.

Độ chênh lệch này được đánh giá là chấp nhận được trong giới hạn kỹ thuật, do phương pháp phần tử hữu hạn có khả năng phản ánh chính xác hơn các yếu tố hình học phức tạp, điều kiện biên thực tế và phân bố tải trọng. Trong khi đó, phương pháp tính tay thường sử dụng các giả thiết đơn giản hóa. Kết quả này khẳng định tính tin cậy của mô hình FEM trong việc phân tích nhíp lá và có thể dùng để hỗ trợ thiết kế tối ưu hóa chi tiết. Bảng 3 thể hiện kết quả mô phỏng ứng suất và chuyển vị của hai loại vật liệu composite.

Bảng 3. Kết quả mô phỏng ứng suất và chuyển vị của hai loại vật liệu composite.

Vật liệu composite	Ứng suất uốn theo trục X (N/mm²)	Ứng suất uốn theo trục Z (N/mm²)	Chuyển vị (mm)	Ứng suất Von-Mises (N/mm²)
Cacbon Epoxy	39,97	6,15	6,97	88,05
Thủy tinh Epoxy	38,26	7,18	14,69	104,24

Bảng số liệu cho thấy sự khác biệt rõ giữa Cacbon Epoxy và Thủy tinh Epoxy về các chỉ tiêu cơ lý. Cụ thể, Cacbon Epoxy có ứng suất uốn theo trục X cao hơn (39,97 N/mm² so với 38,26 N/mm²), nhưng Thủy tinh Epoxy lại có ứng suất uốn cao hơn ở trục Z (7,18 N/mm² so với 6,15 N/mm²). Về chuyển vị, Cacbon Epoxy có giá trị thấp hơn (6,97 mm so với 14,69 mm), cho thấy khả năng chống biến dạng tốt hơn. Ứng suất Von-Mises của Cacbon Epoxy cũng thấp hơn (88,05 N/mm² so với 104,24 N/mm²), chứng tỏ độ bền tổng thể cao hơn. Nhìn chung, Cacbon Epoxy vượt trội về chịu tải, độ bền và chống biến dạng, thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu tính ổn định và độ bền cao, trong khi Thủy tinh Epoxy phù hợp hơn cho các ứng dụng yêu cầu linh hoạt và chi phí thấp.

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả tính toán phân tích và mô phỏng phân tích đã khảo sát. Ta có thể đưa ra một số kết luận sau:

- Phân tích và so sánh giữa Cacbon Epoxy và Thủy tinh Epoxy cho thấy Thủy tinh Epoxy có khả năng chịu ứng suất uốn và đàn hồi tốt hơn Cacbon Epoxy. ☞

- Việc sử dụng vật liệu mới giúp giảm ứng suất đối với từng lá nhíp.

- Khi các lá nhíp được ghép lại thành bộ nhíp, khả năng chịu ứng suất của bộ nhíp sẽ tăng lên nhờ sự cải thiện khả năng chịu tải của từng lá nhíp.

- Composite có thể thay thế lá nhíp thép truyền thống, mang lại nhiều lợi ích về hiệu suất.

- Sử dụng vật liệu composite giúp giảm chi phí, giảm trọng lượng xe, cải thiện hiệu suất sử dụng, kéo dài tuổi thọ các chi tiết máy, tăng tuổi thọ của xe và tiết kiệm nhiên liệu trong quá trình vận hành.❖

Ngày nhận bài: **21/4/2025**
Ngày phản biện: **14/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Rao, V. K., & Iyer, S. V. (2017), "*Design and Analysis of Leaf Spring for Automotive Applications: A Review*". International Journal of Automotive Engineering, 10(4), 349-358.

[2]. Kumar, P., & Verma, V. K. (2014), "*Fatigue and Fracture Behavior of Leaf Spring in Automotive Suspension System*". Journal of Engineering Materials and Technology, 136(3), 031008.

[3]. Nguyễn, M. T., & Trương, P. T. (2020), "*Mô phỏng ứng suất và phân tích tuổi thọ của nhíp lá trong hệ thống treo ô tô tại Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ, 12(5), 123-130.

[4]. Lê, H. Q., & Nguyễn, T. S. (2018), "*Nghiên cứu về vật liệu composite cho nhíp lá ô tô tại Đại học Giao thông Vận tải*". Tạp chí Kỹ thuật Cơ khí, 15(2), 45-55.

LỰA CHỌN VẬT LIỆU CHẾ TẠO RĂNG CẮT PHÁ HỦY ĐẤT ĐÁ SỬ DỤNG TẠI CÁC MỎ THAN HẦM LÒ VÙNG QUẢNG NINH

SELECTION THE APPROPRIATE MATERIALS OF CONICAL PICKS USED IN UNDERGROUND COAL MINE (QUANG NINH, VIETNAM)

TS. **Phạm Thị Thủy***, ThS. **Nguyễn Sơn Tùng**
Trường Đại học Mỏ - Địa chất
**Email: phamthithuy@humg.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày đã phân tích điều kiện làm việc, nguyên nhân các dạng hỏng hóc phổ biến và cơ chế mòn răng cắt phá hủy đất đá trong khai thác mỏ sử dụng trên các máy đào lò liên hợp, máy khấu than sử dụng trong khai thác than hầm lò vùng Quảng Ninh. Từ đó, nhóm tác giả đã đề xuất ra loại vật liệu phù hợp với điều kiện làm việc thực tế để chế tạo phần thân và mũi răng cắt tương ứng là 30CrMnSiNi2A và BK20.

Từ khóa: *Răng cắt phá hủy đất đá; Máy đào lò; Máy khấu than; Chống mài mòn; Thép hợp kim kết cấu; Thép hợp kim hóa tốt.*

ABSTRACT

Combination digging machines and long-wall coal shearers are heavy and robust mining machinery. It seems to be the present picks are not durable enough when carried out in cutting the non-hemogeneous rock in the Quang Ninh underground coal mine, Vietnam. This paper briefly presents theoretical analysis to define the cause of pick's damages, and then proposes the appropriate materials of pick's body and pick's tip. Based on the related papers and researching, the authors selected 30CrMnSiNi2A for the body and carbide BK20 for the tip of conical picks.

Keywords: *Conical pick; Rock cutting; Abrasion resistance; Long-wall coal shearer; Underground combination machinery.*

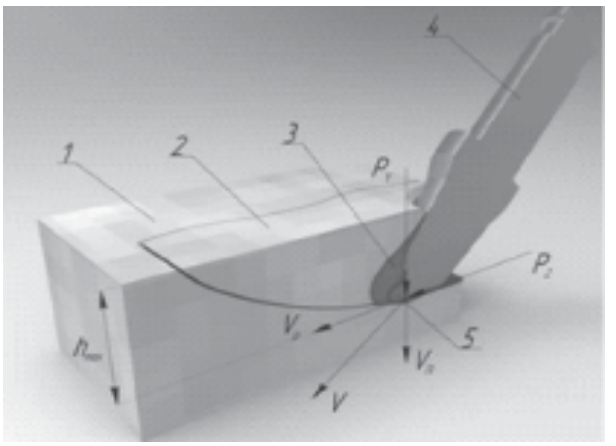
1. MỞ ĐẦU

Thực hiện cơ giới hóa khai thác than hầm lò, máy đào lò liên hợp, máy khấu than liên hợp đã được các đơn vị thuộc TKV nghiên cứu đưa vào sử dụng [8]. Quá trình sử dụng cho thấy, mức tiêu hao răng cắt khá lớn, đặc biệt là các máy khấu có xuất xứ từ Trung Quốc. Trong quá trình làm việc với cường độ lớn, địa chất đất đá phức tạp, không đồng nhất, phần lớn các vỉa than có đất đá xen kẹp nên các răng cắt thường xuyên bị hỏng với các dạng hỏng như mòn, sứt mẻ, vỡ hoặc tụt mảnh hợp kim cứng. Lượng tiêu hao răng cắt với máy khấu than trong điều kiện vỉa than có đá đá kẹp, địa chất phức tạp lên tới (12 ÷ 50) răng/1000 tấn than [7]. Khi cắt trong đất đá cứng và địa chất phức tạp tuổi thọ của răng cắt đôi khi chỉ vài giờ làm việc [4]. Để nâng cao tính tự chủ trong sửa chữa, thay thế răng cắt phá hủy đất đá đáp ☞

ứng nhu cầu sửa chữa rất lớn hiện nay cần có những nghiên cứu lựa chọn vật liệu, phương pháp gia công để tự chủ trong việc chế tạo răng cắt thay thế là vấn đề rất cấp thiết.

2. ĐIỀU KIỆN LÀM VIỆC CỦA RĂNG CẮT PHÁ HỦY ĐẤT ĐÁ

Răng cắt đất đá trên tang khấu của thiết bị đào lò hoặc máy khấu than là một chi tiết dạng hình trụ, phần đầu thuôn nhọn giống hình đầu đạn, phần chuôi được hạ bậc, đuôi có xẻ rãnh vòng hãm. Răng được lắp lên đài đỡ răng gắn trên tang khấu [7]. Trong quá trình cắt đất đá hoặc cắt khấu than, tang khấu quay tròn quanh trục và trục tang khấu chuyển động tịnh tiến theo phương vuông góc với gương lò hoặc gương than. Các răng cắt va đập với khối đất đá hoặc than, nén ép lên khối đất đá gây ra phá hủy thể tích kết hợp với chuyển động của răng cắt thể tích đất đá bị dập nát được tách ra khỏi nguyên khối ban đầu.

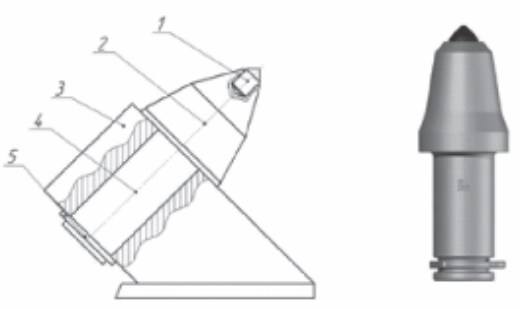


Hình 1. Sơ đồ phá hủy đất đá bằng răng cắt [7]: 1 – Khối đất đá; 2 – Vùng biến dạng đàn hồi; 3 – Vùng vỡ vụn; 4 – Răng cắt; 5 – Vùng nén ép (tâm áp lực)

Hình 1 mô tả quá trình phá hủy đất đá bằng răng cắt. Răng cắt nén lên khối đất đá một lực P có phương dọc theo trục răng cắt. Dưới tác dụng của lực nén P gây ra ứng suất nén trong thể tích đất đá. Ứng suất nén lan toả trong thể tích khối đất đá. Trong trường hợp lý tưởng, đất đá nguyên khối và đồng nhất thì ứng suất phân bố trong không gian bán cầu với tâm bán cầu tại vị trí tiếp xúc giữa mũi răng cắt và đất đá. Tại vùng thể tích có ứng suất nén vượt qua giới hạn bền của đất đá thì đất đá bị vỡ vụn, dập nát và ở những vị trí có ứng suất nhỏ đất đá bị biến dạng đàn hồi. Tại tâm áp lực (vùng màu đỏ), đất đá bị nghiền nát thành dạng bột. Xung quanh vùng thể tích nghiền nát, đất đá bị vỡ vụn gọi là vùng ép vỡ đàn hồi (vùng màu xanh). Ngoài cùng là một vùng biến dạng đàn hồi và xuất hiện các vết nứt do mỏi. Do các răng cắt lần lượt va đập, cắt đất đá nên ứng suất và biến dạng đàn hồi trong khối đất đá có dạng xung mạch đập. Biến dạng đàn hồi dạng mạch đập góp phần phá vỡ đất đá theo cơ chế phá hủy mỏi. Thể tích của vùng nứt vỡ phụ thuộc vào lực nén ép và độ kiên cố, tính giòn của đất đá và khoảng cách từ tâm áp lực tới mặt thoáng gương lò [5] và [7].

Mặt trước của răng cắt tiếp xúc với đất đá vỡ vụn, phần này chịu ma sát nhỏ nhưng chịu nén lớn. Mặt sau của răng cắt tiếp xúc với đất đá nguyên khối chưa bị phá hủy, phần này chịu lực ma sát lớn và bị mài mòn. Xét trong một phạm vi góc quay nhỏ xung quanh tâm quay của răng cắt thì coi như răng cắt có chuyển động tịnh tiến. Lực cắt P được chia làm hai thành phần: P_y và P_z. Lực P_z có phương tiếp tuyến với quỹ đạo chuyển động của mũi răng cắt, có vai trò bóc tách khối đất đá trong vùng phá hủy và vùng dập nát ra khỏi nguyên khối ban đầu. Lực P_y có phương pháp tuyến, có giá trị phụ thuộc vào tính chất đàn hồi của đất đá, nếu đất đá có độ đàn hồi cao và độ kiên cố lớn thì lực P_y lớn, [1] và [7]. Dưới tác dụng của phản lực pháp tuyến của khối đất đá và chuyển động trượt của mặt sau răng cắt sẽ xuất hiện lực

ma sát gây nên mài mòn răng cắt, khi răng cắt bị mòn thì góc sắc của răng giảm dẫn tới lực nén cần thiết P tăng lên. Khi đó, thể tích đất đá bị nghiền vụn tăng lên, vùng thể tích dập nát thu hẹp lại, hiệu quả phá hủy đất đá giảm, mức độ mài mòn răng tăng lên, [5] và [7]. Để khắc phục hiện tượng này, mối ghép giữa chuôi răng cắt và lỗ đài đỡ răng cắt là mối ghép lỏng, cho phép răng cắt xoay được quanh trục răng cắt, từ đó răng mòn đều và tự được mài sắc, [4] và [7]. Tại vùng mỏ Quảng Ninh, các vỉa than thường nằm xen kẹp giữa các tầng đất đá cát kết, bội kết, sét kết và sét than, độ kiên cố lên tới f = 8 ÷ 10 theo thang chia độ bền kháng nén một trục của Giáo sư M. M. Protodiaconov [7].



Hình 2. Cấu tạo răng cắt phá hủy đất đá:
1 – Mũi răng cắt; 2 – Đầu răng cắt;
3 – Đài đỡ răng cắt; 4 – Chuôi răng cắt;
5 – Vòng hãm

Như phân tích trên, khi răng cắt nén lên khối đất đá với áp lực P thì khối đất đá biến dạng, dập nát, nứt vỡ và răng cắt sẽ tiến sâu vào đất đá một chiều sâu h. Lực nén dọc trục cần thiết P trên răng cắt phá hủy đất đá phụ thuộc vào độ kiên cố của đất đá, tính đàn hồi của đất đá, góc sắc nhọn của đỉnh răng cắt và chiều sâu cắt mong muốn. Lực nén cần thiết P đối với răng cắt phá hủy đất đá mũi cắt dạng côn được xác định như sau [2]:

$$P = \frac{2 \cdot E \cdot h^2 \cdot tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi \cdot \left(1 - \upsilon^2\right)} \qquad (2\text{-}1)$$

Trong đó: P – Lực nén dọc trục trên răng cắt, N; E – Mô-đun đàn hồi của đất đá, N/m^2; h – Độ ngập sâu của răng cắt vào khối đất đá, m^2; α – Góc côn của đỉnh răng; υ – Hệ số pission của đất đá.

Thành phần lực pháp tuyến P_y:

$$P_y = P \cdot sin\varphi \qquad (2\text{-}2)$$

Trong đó: P – Lực nén dọc trục trên răng cắt, N; φ – Góc nghiêng trục răng cắt (góc cắt); P_y – Thành phần lực theo phương pháp tuyến, N.

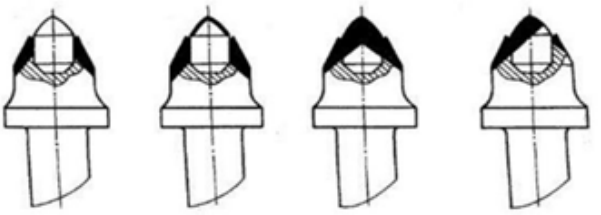
Lực ma sát theo phương tiếp tuyến tại mặt sau của răng cắt:

$$F_f = f \cdot P_y \qquad (2\text{-}3)$$

Trong đó: F_f – Lực ma sát theo phương tiếp tuyến, N; f – Hệ số ma sát của đất đá; P_y – Thành phần lực theo phương tiếp tuyến, N.

Về cơ bản răng cắt chỉ chịu nén và chịu mài mòn trên bề mặt. Các răng lần lượt vào cắt phá hủy đất đá rồi thoát ra ngoài nên tải trọng nén tác dụng lên răng cắt có dạng chu kỳ, mạch đập. Phần mũi răng cắt và đầu thân răng có ứng suất lớn. Trong quá trình cắt, nhiệt độ phát sinh tại mũi răng cắt có thể lên tới 1100°C. Do đó, răng cắt phá hủy đất đá thường có các dạng hỏng như sau [7]: Mòn do ma sát; Bong tróc bề mặt mũi răng cắt và vùng kim loại của thân răng cắt bao quanh mũi hợp kim do hiện tượng ô-xy hóa hình thành các vảy ô-xít, hiện tượng tôi cục bộ hoặc hiện tượng kết tinh lại do nhiệt phát sinh lớn khi cắt; Nứt vỡ, sứt mẻ răng cắt do mỏi; Tụt đầu hợp kim do dão, do biến dạng dẻo cùng với do mòn giảm kích thước phần chóp côn của thân răng cắt dẫn tới giảm khả năng đàn hồi, giảm ma sát tại mối ghép giữa thân răng cắt và mũi hợp kim cứng; Tụt đầu ☞

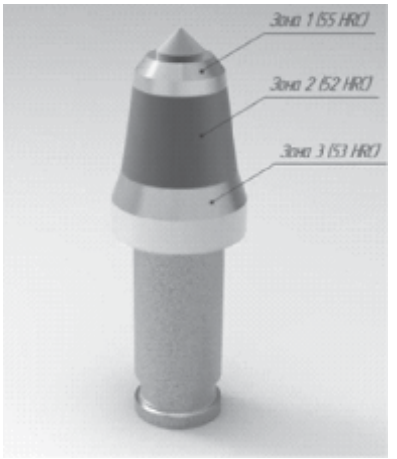
hợp kim cứng do mòn, gãy mối hàn; Gãy chuôi răng do quá tải, do mỏi.



Hình 3. Một vài dạng hỏng răng cắt phá hủy đất đá do mòn

3. VẬT LIỆU CHẾ TẠO RĂNG CẮT PHÁ HỦY ĐẤT ĐÁ

Phần mũi răng cắt chịu ứng suất lớn và mài mòn mãnh liệt, đặc biệt khi cắt phá hủy đất đá có độ kiên cố lên tới f = 10, có tính mài mòn cao, nhiệt độ phát sinh khi cắt lên tới trên 1000°C. Đầu mũi răng thường được chế tạo từ các vật liệu: BK8, BK5B, BK10KC, BK12KC. Gần đây, một số nghiên cứu thử nghiệm sử dụng vật liệu gốm thay thế vật liệu hợp kim cứng nhằm mục đích bền mòn trong điều kiện phát sinh nhiệt độ lớn [7].



Hình 4. Yêu cầu độ cứng bề mặt thân răng cắt phá hủy đất đá

Cũng theo tài liệu này, phần thân răng cắt được chế tạo từ thép hợp kim hóa tốt hoặc thép hợp kim kết cấu như 40X, 40XM, 30XГCA [7]. Thép hợp kim kết cấu làm tăng cơ tính tổng hợp của thép như tăng độ bền, độ dai va đập, giới hạn bền mỏi lớn. Ngoài ra, các thành phần nguyên tố hợp kim như Si giúp tăng độ đàn hồi, chống dão, sự có mặt của Cr, Ni, Al giúp tăng khả năng bền nhiệt [3]. Nhóm thép này đạt được độ cứng bề mặt sau khi nhiệt luyện lên tới 60 HRC mà vẫn giữ được độ dẻo dai bên trong, đảm bảo khả năng chịu tải trọng lớn, tải trọng va đập và có giới hạn mỏi cao. Phần thân răng cắt cần độ cứng bề mặt yêu cầu lên tới (50 ÷ 55) HRC [7]. Phần mũi răng cắt, hợp kim cứng được hàn hoặc ép vào lỗ trên thân răng cắt (mối ghép có độ dôi). Do vậy, vật liệu chế tạo thân răng cắt phải có độ dẻo dai, giới hạn bền lớn nhưng tỷ lệ biến dạng dẻo (hay còn gọi là dão) thấp. Độ dai va đập cần đạt tới 25 J/cm^2, độ bền kéo không nhỏ hơn 1000 MPa, phần đầu thân răng cắt tiếp xúc với đất đá cần đạt độ cứng bề mặt tối thiểu 50 HRC, phần chuôi răng cắt có độ cứng khoảng (35 ÷ 40) HRC [4].

4. LỰA CHỌN VẬT LIỆU CHẾ TẠO RĂNG CẮT

Thứ nhất, dựa trên cơ sở phân tích điều kiện làm việc của răng cắt phá hủy đất đá, nguyên nhân dẫn tới mòn hỏng răng cắt và một số thông tin vật liệu chế tạo răng cắt đã được công bố trong một số tài liệu tính toán thiết kế liên quan.

Thứ hai, trên cơ sở phân tích đặc điểm vật liệu kim loại, các nhãn hiệu thép hợp kim chất lượng cao dành cho chế tạo chi tiết máy làm việc trong điều kiện tải trọng lớn, tải trọng động, tải trọng va đập và nhiệt độ lớn [3].

Lựa chọn vật liệu chế tạo thân răng cắt phá hủy đất đá là thép hợp kim có độ bền, độ dai và có khả năng chịu nhiệt độ tốt: 30CrMnSiNi2A.

Ngoài ra, thép 30CrMnSiNi2A còn chứa các nguyên tố Al, Cu, Ni. Trong quá trình nung nóng chậm (nhiệt luyện sau gia công) sẽ hình thành các hợp chất Al_2O_3, Các-bít khó tan hạt mịn được hình thành ở biên các hạt Austenit. Do đó, thu được tổ chức Austenit hạt nhỏ khi nung tới nhiệt độ tôi. Sau khi áp dụng quy trình nhiệt luyện hợp lý sẽ thu được cơ tính mong muốn [6]. Lựa chọn vật liệu chế tạo mũi cắt là vật liệu hợp kim cứng độ bền cao, chịu mài mòn và bền nhiệt: BK20.

5. KẾT LUẬN

Cơ giới hóa khai thác than, sử dụng các máy đào lò liên hợp, máy khấu than liên hợp là một xu thế tất yếu hiện nay ở nước ta. Do địa chất vỉa than ở vùng Quảng Ninh có tính chất phức tạp, đất đá có độ kiên cố lớn dẫn tới mức tiêu hao răng cắt phá hủy đất đá lớn. Qua phân tích điều kiện làm việc của răng cắt cho thấy dạng hỏng mòn thân răng, bong tróc bề mặt mũi hợp kim là hai dạng hỏng chủ yếu cần phải khắc phục.

Căn cứ theo tài liệu vật liệu kỹ thuật, tính toán thiết kế máy nhóm nghiên cứu đã đề xuất lựa chọn vật liệu chế tạo mũi răng cắt và phần thân răng cắt tương ứng là hợp kim BK20 hoặc tương đương và thép hợp kim 30CrMnSiNi2A hoặc tương đương.❖

Ngày nhận bài: **09/4/2025**
Ngày phản biện: **28/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. A Prakash, V. M. S. R. Murthy, K. B. Singh, C. Kumar and L. A. Kumaraswamidhas (2016), "*A methodology for designing cutting drum of surface miner to achieve production of desired chip size*". Indian Academic of Sciences.

[2]. Gao Kuidong, Du Changlong, Jiang Hongxiang, Liu Songyong (2014), "*A theoretical model for predicting the Peak cutting force of conical pick*". Journal of Mining Engineering, China.

[3]. Hà Văn Vui, Nguyễn Chỉ Sáng, Phan Đăng Phong (2006), "*Sổ tay Thiết kế cơ khí - Tập 1*". NXB. Khoa học Kỹ thuật.

[4]. Lukasz Boloz (2019), "*Direction for increasing conical picks' durability*". AGH University of Science and Technology, Poland.

[5]. Nguyễn Hoàng, Bùi Xuân Nam (2015), "*Ứng dụng bài toán Bousinessq để xác định các thông số của đầu đập thuỷ lực khi phá vỡ đất đá trên mỏ lộ thiên*". Tạp chí Khoa học Công nghệ Mỏ, số 4, năm 2015.

[6]. Nguyễn Thị Yên (2005), "*Giáo trình Vật liệu cơ khí*". NXB. Hà Nội.

[7]. Phạm Văn Tiến (2021), "*Luận án tiến sỹ kỹ thuật – Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố đến tuổi thọ của răng cắt trên tang máy khấu dùng trong khai thác than hầm lò vùng Quảng Ninh*". Trường Đại học Mỏ - Địa chất.

[8]. https://moit.gov.vn/khoa-hoc-va-cong-nghe/than-vang-danh-hieu-qua-cua-viec-ung-dung-may-dao-lo-combai-2.html

PHÂN TÍCH CÁC TÌNH HUỐNG ĐÂM VA TRONG HÀNG HẢI VÀ CÁC BÀI HỌC KINH NGHIỆM DỰA TRÊN QUY TẮC COLREGs 72

ANALYSIS OF NAVIGATION COLLISION CASES AND THE LESSONS LEARNED BASED ON COLREGs 72

Nguyễn Thành Trung
Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: Nguyenthanhtrung@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Để nâng cao an toàn hàng hải, giảm thiểu các vụ tai nạn, sự cố trong quá trình khai thác tàu, IMO, các công ty vận tải biển và các tổ chức liên quan cũng như cộng đồng người đi biển đã nỗ lực không ngừng thể hiện quyết tâm cao trong việc tạo ra môi trường làm việc an toàn, hạn chế các rủi ro có thể gây ra tai nạn, sự cố. Một trong những giải pháp là chia sẻ rộng rãi những kinh nghiệm rút ra từ việc phân tích các tình huống sự cố trên biển cũng như khi ở trong cảng, qua đó giúp cộng đồng vận tải biển hiểu được các yếu tố có thể dẫn tới các sự cố phổ biến và rút ra kinh nghiệm đặc biệt từ các quyết định được đưa ra trên tàu vào thời điểm đó.

Từ khóa: *Thiết bị ghi dữ liệu hành trình; Quy tắc phòng ngừa đâm va tàu thuyền trên biển; Tự động đồ giải tránh va.*

ABSTRACT

To enhance maritime safety and reduce accidents during operations, the IMO and maritime advisory organizations, along with the global maritime community, continuously seek solutions to create a safer working environment and minimize risks leading to accidents and incidents. One effective approach is the broad sharing of lessons learned from collision situations. The analysis of such scenarios provides valuable insights into the causes, thereby helping maritime communities identify key contributing factors, coordinate responses, and gain experience in making critical decisions onboard.

Keywords: *Voyage Data Recorder; Convention of International Regulations for Preventing Collisions at Sea; Automatic Radar Plotting Aid.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vận tải biển đóng vai trò vô cùng quan trọng đối với sự phát triển kinh tế toàn cầu, đồng thời cũng đang thừa hưởng những thành tựu vượt bậc của nền khoa học và công nghệ tiên tiến trong kỷ nguyên chuyển đổi số.

Bên cạnh những lợi ích mà các tiến bộ này mang lại, vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định. Chẳng hạn, ví dụ đối với nền tự động hóa, nó có thể giúp nâng cao hiệu quả vận hành, nhưng bên cạnh đó cũng có thể dẫn đến sự cố do lỗi chủ quan hoặc do hạn chế về mặt trình

độ của con người [1-4]. Trong bất kỳ thời đại nào, việc giảm thiểu sự cố và tai nạn – đặc biệt là những vụ đâm va tàu, vốn gây thiệt hại nặng nề về tài sản và con người – luôn được đặt lên hàng đầu và là ưu tiên số một.

Do đó, rất cần có những nghiên cứu phân tích về các tình huống đâm va trong điều kiện đặc biệt, nhằm rút ra bài học kinh nghiệm cho người đi biển, và việc chia sẻ rộng rãi kiến thức này trong cộng đồng hàng hải sẽ giúp ngăn ngừa các sự cố tương tự có thể xảy ra trong tương lai.

2. PHÂN TÍCH CÁC TÌNH HUỐNG SỰ CỐ VÀ BÀI HỌC KINH NGHIỆM

2.1. Va chạm khi tàu vượt nhau ở biển Baltic



Hình 1. Minh họa tình huống va chạm khi tàu vượt nhau ở biển Baltic

2.1.1. Mô tả tình huống

Tàu A, một tàu chở hàng tổng hợp loại nhỏ, đang di chuyển vào ban đêm trong một khu vực có mật độ tàu thuyền đông đúc ở biển Baltic. Tầm nhìn xa tốt, gió tây cấp 3 theo thang Beaufort. Tàu duy trì tốc độ khoảng 10 hải lý/giờ.

Radar ARPA băng tần S được cài đặt ở chế độ lệch tâm với thang tầm xa 12 hải lý, định hướng bắc thật và chế độ chuyển động tương đối. Radar băng tần X đang ở chế độ chờ. Cả hai radar đều có vùng mù giống nhau do cột đèn được đặt gần nhau trên tàu.

Thiết bị trên buồng lái bao gồm hải đồ điện tử ECDIS, được Thuyền trưởng cùng với sĩ quan trực ca theo dõi. Thủy thủ cảnh giới cũng có mặt trên buồng lái [3].

2.1.2. Nguyên nhân

Trong ca trực, thuyền phó hai nhận thấy một tàu đang vượt qua họ ở bên mạn trái nhưng không nhận ra rằng tàu B cũng đang vượt qua họ ở bên mạn phải. Anh ta liên tục chuyển đổi radar giữa chế độ màn hình hiển thị và chế độ lệch tâm. Thủy thủ cảnh giới đứng ở cánh gà buồng lái bên mạn trái [5].

Thuyền trưởng đã lưu dữ liệu qua VDR. Tuy nhiên, chỉ có radar băng tần X được kết nối với VDR, và do radar này đang ở chế độ chờ, nên ảnh chụp màn hình radar về tình huống quá cận đã không được ghi lại.

Theo Quy tắc COLREGs 72, trong vụ va chạm trên, tàu B đang vượt tàu A, do đó tàu B có trách nhiệm nhường đường. Tuy nhiên, tàu A chỉ phát hiện thấy tàu B một phút trước khi va chạm, và chỉ riêng hành động của tàu B là không đủ để tránh va chạm. Trong tình huống này, tàu A lẽ ra phải có hành động phối hợp để hỗ trợ tránh va và vụ va chạm xảy ra một phần cũng do việc cảnh giới kém [6].

2.1.3. Hậu quả

Thuyền phó hai đang theo dõi radar ARPA băng tần S thì phát hiện một mục tiêu ở phía sau, bên mạn phải – nó ở rất gần. Đó là tàu B, và chỉ còn một phút nữa là xảy ra va chạm. Anh ta quay lại nhìn ra ngoài qua cửa sổ buồng lái phía sau, bên mạn phải, và thấy tàu B gần như ở ngay trên trục ngang của tàu họ. Anh ta cố gắng gọi cho Thuyền trưởng nhưng không liên lạc được. Ngay sau đó, anh ta chuyển sang chế độ lái tay và bẻ ☞

lái hết cỡ sang mạn phải, hướng về phía tàu đang vượt. Hậu quả là va chạm đã xảy ra.

Ngay sau cú va chạm, Thuyền trưởng lên buồng lái. Ông ta nhận thấy máy vẫn đang ở chế độ tới hết máy và bánh lái đang bẻ hết sang mạn phải, nhưng tàu không quay được. Ông ta giảm tốc độ máy xuống còn 60%, nhưng tàu A vẫn không di chuyển. Tàu B đã đâm vào tàu A ở bên mạn phải, ngay tại hầm hàng số 2. Một lúc sau, tàu B cho chạy máy lùi và hai tàu đã tách rời nhau [5], [7], [8].

Thuyền trưởng cố gắng liên lạc với tàu B. Ban đầu, Sĩ quan trực ca trên tàu B chỉ cho rằng họ suýt va chạm, nhưng sau một lúc, họ thừa nhận rằng mình đã gây ra vụ va chạm.

2.1.4. Bài học kinh nghiệm

Bài học từ việc phân tích nguyên nhân: Bài báo đã mô tả một vụ tai nạn giữa hai tàu, tàu A và tàu B. Tàu B đã vượt tàu A từ phía mạn phải (starboard quarter) và không thay đổi hướng đi hoặc tốc độ. Theo COLREGs 72, tàu A là tàu được ưu tiên (stand-on vessel), trong khi tàu B có trách nhiệm nhường đường (give-way vessel). Và tàu B đã không thực hiện trách nhiệm nhường đường của mình.

Nguyên nhân chính của vụ tai nạn là do việc cảnh giới kém (poor lookout) từ các thuyền viên trên buồng lái của tàu B. Mặc dù tàu A có quyền ưu tiên, nhưng việc duy trì quan sát 360 độ và sử dụng đầy đủ các thiết bị có sẵn trên buồng lái vẫn là yếu tố quan trọng để phòng ngừa va chạm khi hành hải [1].

Các bài học khác rút ra để tránh các tai nạn tương tự trong tương lai [8]:

- Duy trì cảnh giới thích hợp bằng mắt thường và các thiết bị điện tử hỗ trợ như radar.
- Thường xuyên thảo luận và cập nhật thông tin về các tàu xung quanh giữa sĩ quan trực ca (OOW) và thủy thủ cảnh giới.
- Sử dụng cả hai radar X-band và S-band (nếu có) một cách hiệu quả để phát hiện các mục tiêu, đặc biệt là các mục tiêu nhỏ.
- Đảm bảo rằng luôn có thuyền viên cảnh giới báo cáo đầy đủ và kịp thời về các mục tiêu được phát hiện.
- Tuân thủ nghiêm ngặt các quy định về việc ghi lại dữ liệu radar trên thiết bị ghi dữ liệu hành trình (VDR).

Chất lượng hình ảnh đã thu được trên thiết bị ghi dữ liệu hành trình:

* Hình ảnh có độ phân giải khá tốt, cho phép đọc được nội dung văn bản.
* Ánh sáng trong ảnh đồng đều, không có bóng đổ hoặc phản xạ gây khó đọc.
* Thông tin được trình bày rõ ràng, dễ đọc.

2.2. Va chạm trong điều kiện tầm nhìn xa bị hạn chế khi vào cảng



Hình 2. Minh họa tình huống va chạm trong điều kiện tầm nhìn xa bị hạn chế khi vào cảng

2.2.1. Mô tả tình huống

+ Tàu A (tàu container 1000 TEU): Tàu đang tiếp cận trạm hoa tiêu với tốc độ 17 hải lý/

giờ, lái ở chế độ lái tay và trên hướng 280 độ. Bên ngoài tầm nhìn bị hạn chế khoảng 0,1 hải lý do sương mù.

+ Tàu B (tàu chở dầu nhỏ): Ban đầu được phát hiện trên radar của Tàu A cách 4 hải lý, ở góc mạn 10 độ bên mạn trái, với CPA (điểm tiếp cận gần nhất) là 0,2 hải lý. Tàu B đang đi với tốc độ 6 hải lý/giờ và trên hướng khoảng 280 độ.

+ Trong vài phút trước vụ va chạm, với thông tin về hướng, CPA và khoảng cách của Tàu B so với Tàu A tại các thời điểm khác nhau là khác nhau, đặc biệt là CPA đang giảm dần, cho thấy nguy cơ va chạm tồn tại và ngày càng nguy hiểm [3].

2.2.2. Nguyên nhân

- Do tầm nhìn hạn chế: Sương mù dày đặc là yếu tố chính dẫn đến vụ va chạm.

- Do giám sát bằng radar kém: Tàu A sử dụng hai radar ARPA để theo dõi tình hình, nhưng không thể ngăn chặn vụ va chạm do giám sát bằng radar kém.

- Do hành động sai của Thuyền trưởng: Thuyền trưởng Tàu A đã thực hiện các biện pháp phòng ngừa (bật còi sương mù, theo dõi radar) nhưng có thể đã đánh giá sai tình hình hoặc phản ứng quá muộn dẫn đến va chạm.

- Nguyên nhân do các yếu tố:

+ Cả hai tàu đều không duy trì cảnh giới thích hợp.

+ Tàu A di chuyển với tốc độ không an toàn trong điều kiện tầm nhìn hạn chế và gần khu vực đông đúc tàu thuyền.

+ Tàu A đã phát hiện Tàu B trên radar nhưng không hành động kịp thời để tránh va chạm.

+ Tàu B có thể đã thay đổi hướng đi theo kế hoạch hành trình của mình.

+ Tàu A đang vượt Tàu B và do đó có trách nhiệm giữ khoảng cách an toàn [6].

2.2.3. Hậu quả

Mặc dù Thuyền trưởng Tàu A đã ra lệnh bẻ lái gấp sang mạn phải và dừng máy, nhưng không thể tránh khỏi va chạm. Tàu A đâm vào Tàu B, khiến tàu này bị nghiêng nặng và thủy thủ đoàn phải rời tàu.

- Tất cả thủy thủ đoàn của Tàu B đã được Tàu A cứu sống [5], [7].

2.2.4. Bài học kinh nghiệm[8]

Qua phân tích tình huống, có thể rút ra một số bài học kinh nghiệm sau:

- Cần phải duy trì cảnh giới thích hợp và duy trì tốc độ an toàn trong điều kiện tầm nhìn hạn chế.

- Phải sử dụng đúng cách thiết bị radar ARPA để phát hiện và theo dõi các tàu khác.

- Phải hành động sớm và dứt khoát để tránh va chạm.

- Phải hiểu rõ cách áp dụng các quy tắc COLREGs và các hạn chế của thiết bị dẫn đường.

2.3. Đâm va khi đang điều động trong sông ☞



Hình 3. Minh họa tình huống đâm va khi đang điều động trong sông

2.3.1. Mô tả tình huống

+ Thời gian và địa điểm: Vụ việc xảy ra vào giữa đêm trên một con sông với mật độ giao thông đông đúc.

+ Các tàu liên quan:

✓Tàu A: Một tàu container 6.500 TEU, đang rời cảng.

✓ Tàu B: Một tàu chở hàng rời cỡ nhỏ (handymax), đang đến cảng.

+ Điều kiện thời tiết: Thời tiết tốt, trời quang đãng, gió cấp 6 Beaufort.

+ Tàu B giảm tốc độ để căn giờ cập cầu cảng, nhưng đánh giá thấp tác động của gió và dòng chảy, dẫn đến bị trôi sang luồng đi của tàu A.

+ Tàu A có hoa tiêu trên tàu [3].

2.3.2. Nguyên nhân

+ AIS của tàu A không hoạt động.

+ Nỗ lực liên lạc và tránh va chạm của tàu A không thành công.

+ Phần này mô tả một vụ tai nạn hàng hải nguyên nhân do sự kết hợp của nhiều yếu tố như đánh giá sai điều kiện thời tiết, thiết bị liên lạc không hoạt động và không đủ không gian để điều động.

+ Lỗi từ phía tàu A: Nếu thuyền trưởng của tàu A làm rõ ý định của tàu B, thì có thể đã tránh được va chạm.

+ Lỗi chính thuộc về tàu B: Tàu B đã trôi vào luồng ngược chiều khi giảm tốc độ làm cho khả năng ăn lái của tàu kém. Không rõ nguyên nhân tại sao tàu B không phản hồi tín hiệu từ tàu A hoặc không có hành động nào để ngăn chặn việc trôi dạt.

- Tầm quan sát và đánh giá tình hình: Cần liên tục đánh giá tình hình giao thông, đặc biệt ở những khu vực đông đúc như trong cảng. Trong vụ việc này, tàu A bị khiển trách vì chạy vị quá gần mép luồng tàu dẫn đến khi đổi hướng không có vùng nước đủ rộng để quay trở, nhưng lỗi chính thuộc về tàu B do không duy trì tầm quan sát thích hợp, không phản hồi liên lạc và không tránh va chạm.

- Kế hoạch khởi hành: Cần có cuộc trao đổi ngắn gọn trước khi khởi hành để thảo luận các tình huống có thể xảy ra và xác định rủi ro tiềm ẩn.

- Vấn đề khác: Hệ thống AIS của Tàu A không hoạt động [1].

2.3.3. Hậu quả

Tình huống mô tả chi tiết về một vụ va chạm cụ thể, phân tích lỗi của cả hai tàu (tàu A và tàu B), đặc biệt nhấn mạnh lỗi của tàu B khi không duy trì quan sát thích hợp, không phản hồi liên lạc VHF và trôi vào luồng đối diện.

+ Va chạm xảy ra, nhưng không có thương vong hay bị ô nhiễm.

+ Tàu A có thể quay sang phải, nhưng không có vùng nước đủ rộng để tránh tàu B.

+ Tàu A đã cố gắng liên lạc bằng đèn tín hiệu và VHF nhưng tàu B không trả lời.

+ Thuyền trưởng tàu A đã lưu dữ liệu VDR sau tai nạn [5], [7].

2.3.4. Bài học kinh nghiệm [8]

- Bài học về Trách nhiệm của thuyền viên: Bài báo đề cập đến một vụ va chạm giữa hai tàu (tàu A và tàu B), trong đó thuyền viên của cả hai tàu đều bị cho là có lỗi. Các lỗi bao gồm việc không duy trì cảnh giới thích hợp, không phản hồi trên VHF, và tàu B không tránh xa tàu A khi tàu A trôi dạt. Ngoài ra, tàu A còn bị lỗi về việc để AIS không hoạt động.

- Bài học về an toàn:

+ Thảo luận trao đổi trước khi tàu khởi hành: Cần có thảo luận và trao đổi ngắn trước khi khởi hành về các tình huống khác nhau và qua đó xác định các rủi ro tiềm ẩn.

+ Trao đổi với hoa tiêu: Thuyền trưởng cần thảo luận kế hoạch điều động với hoa tiêu khi hoa tiêu lên tàu. Cần hỏi về các quy định địa phương, quy định về giao thông liên quan, dòng chảy và gió dự kiến, cũng như các yêu cầu vượt qua nhau và cách tiếp cận mục tiêu của hoa tiêu. Nếu hoa tiêu sử dụng ngôn ngữ địa phương, cần dịch sang tiếng Anh cho thuyền viên.

+ Thẩm quyền của thuyền trưởng: Nếu thuyền trưởng không tin tưởng vào lệnh của hoa tiêu, cần bày tỏ lo ngại ngay lập tức. Nếu tin rằng an toàn của tàu bị đe dọa, thuyền trưởng phải cướp lệnh hoặc yêu cầu thay thế hoa tiêu.

- Sự tự tin và được đào tạo: Thuyền trưởng cần đủ tự tin và được đào tạo đầy đủ để đưa ra phản hồi một cách chính xác. An toàn của thuyền viên và con tàu phải luôn là ưu tiên hàng đầu trong mọi tình huống.

Như vậy, để đảm bảo an toàn, cần tuân thủ các quy trình an toàn, giao tiếp hiệu quả và cần có sự quyết đoán của thuyền trưởng trong việc đảm bảo an toàn hàng hải.

3. KẾT LUẬN

Bài báo phân tích sâu sắc về những vụ đâm va cụ thể, từ đó rút ra các bài học quan trọng về phòng ngừa đâm va trong hàng hải dựa trên việc tuân thủ và nhận thức đầy đủ về quy tắc COLREGs 72, đồng thời cũng là nguồn tài liệu tham khảo đối với các sĩ quan hàng hải, thuyền viên và sinh viên hàng hải trong việc sử dụng đúng cách các thiết bị dẫn đường, cảnh bảo việc phải hành động sớm để tránh va chạm và tránh đưa ra những quyết định cũng như hành động quá trễ dẫn đến tai nạn, gây tổn thất lớn về người và tài sản cũng như gây ô nhiễm môi trường biển. Bài báo là nguồn tài liệu hữu ích để giúp tìm hiểu về các nguyên nhân gây ra tai nạn hàng hải và đưa ra các biện pháp phòng ngừa. ❖

Ngày nhận bài: **25/4/2025**
Ngày phản biện: **12/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Công ước Quốc tế về Quy tắc Phòng ngừa Đâm va trên biển 1972 (COLREGs 72).
[2]. Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO).
[3]. www.swedishclub.com.
[4]. TS. Mai Xuân Hương, "*Nghiên cứu năng lực của sỹ quan hàng hải Việt Nam trong xử lý tình huống có nguy cơ đâm va tàu trên biển trong trực ca độc lập*".
[5]. TS. Nguyễn Viết Thành (8/2005), "*Điều động tàu*". NXB. Hàng hải.
[6]. T.Tr. Tiếu Văn Kinh (2011), "*Tóm tắt quy tắc phòng ngừa đâm va tàu thuyền trên biển*". NXB. Hàng hải.
[7]. T.Tr. Tiếu Văn Kinh (2010), "*Sổ tay hàng hải*". NXB. Hàng hải.
[8]. Bộ môn Hàng hải cơ sở (2025), "*Tài liệu học tập Quy tắc quốc tế về phòng ngừa đâm va tàu thuyền trên biển*". NXB. Hàng hải.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TUỔI ĐỜI XE VÀ CHẾ ĐỘ BẢO DƯỠNG ĐẾN CHẤT LƯỢNG PHÁT THẢI CỦA XE MÁY PHUN XĂNG ĐIỆN TỬ ĐANG LƯU HÀNH

STUDY THE EFFECT OF LIFESPAN AND THE MAINTENANCE CHARACTERISTICS ON THE EMISSION QUALITY OF IN-USED FI MOTORCYCLES

Nguyễn Thế Lương
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: luong.nguyenthe@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của tuổi đời và chế độ bảo dưỡng đến mức phát thải khí CO và HC của xe máy phun xăng điện tử (FI) đang lưu hành tại Việt Nam. Tổng cộng 176 xe FI có dung tích xi lanh từ 50 cm³ đến 125 cm³, với thời gian sử dụng từ dưới 3 năm đến trên 10 năm, đã được lựa chọn làm đối tượng thử nghiệm. Phương pháp thử nghiệm được thực hiện theo tiêu chuẩn TCVN 11215:2015, bao gồm làm nóng động cơ, kiểm tra bướm ga ở chế độ không tải và lấy mẫu khí thải theo đúng quy trình kỹ thuật. Hoạt động bảo dưỡng gồm thay thế hoặc kiểm tra bugi, lọc gió và dầu bôi trơn, tùy theo tình trạng thực tế của từng xe. Kết quả cho thấy, nồng độ khí CO và HC có xu hướng tăng theo tuổi đời xe, đặc biệt rõ rệt ở nhóm xe sử dụng trên 7 năm. Trước bảo dưỡng, nồng độ trung bình CO đạt 1,11% và HC đạt 282 ppm. Sau bảo dưỡng, hai chỉ số này giảm còn 0,61% CO (giảm 45%) và 204 ppm HC (giảm 28%). Việc bảo dưỡng giúp cải thiện đáng kể hiệu suất đốt cháy và giảm phát thải ở tất cả các nhóm tuổi đời, đặc biệt hiệu quả đối với các xe cũ. Nghiên cứu khẳng định tầm quan trọng của việc bảo dưỡng định kỳ đối với xe máy FI trong việc kiểm soát phát thải và bảo vệ môi trường đô thị. Kết quả là cơ sở khoa học hữu ích phục vụ công tác xây dựng chính sách kiểm định khí thải xe máy tại Việt Nam trong thời gian tới.

Từ khóa: *Xe máy phun xăng điện tử; Bảo dưỡng; Tuổi đời; Phát thải CO và HC.*

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the impact of vehicle age and maintenance practices on CO and HC emissions from fuel-injected (FI) motorcycles currently in use in Vietnam. A total of 176 FI motorcycles with engine displacements ranging from 50 cm³ to 125 cm³ and service durations from less than 3 years to over 10 years were selected as the test subjects. Emission measurements were conducted under idle conditions in accordance with Vietnamese Standard TCVN 11215:2015, including procedures for engine warm-up, throttle setting, and exhaust gas sampling. Maintenance activities involved the replacement or inspection of spark plugs, air filters, and engine oil, depending on the actual condition of each vehicle. The results show a clear trend of increasing

CO and HC emissions with vehicle age, particularly for motorcycles in service for more than 7 years. Prior to maintenance, the average CO concentration was 1.11% and HC was 282 ppm. After maintenance, these values dropped to 0.61% CO (a 45% reduction) and 204 ppm HC (a 28% reduction). The findings demonstrate that regular maintenance significantly improves combustion efficiency and reduces emissions across all age groups, with especially notable benefits for older vehicles. The study underscores the critical role of periodic maintenance in controlling emissions from FI motorcycles and highlights its importance in urban air quality management. The results provide a practical scientific basis for developing future emission inspection and maintenance policies for motorcycles in Vietnam.

Keywords: *FI motorcycle; Maintenance; Age; CO and HC emission.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng và sự gia tăng dân số tại các thành phố lớn ở Việt Nam, xe máy tiếp tục đóng vai trò là phương tiện giao thông chủ yếu, đặc biệt tại các đô thị như Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh. Theo thống kê, số lượng xe máy lưu hành tại Việt Nam đã vượt mốc 50 triệu chiếc, chiếm tỷ lệ lớn trong tổng số phương tiện cơ giới và đóng góp đáng kể vào tình trạng ô nhiễm không khí đô thị [1].

Để giảm thiểu tác động môi trường, công nghệ phun xăng điện tử (Fuel Injection - FI) đã được áp dụng rộng rãi nhằm thay thế hệ thống chế hòa khí truyền thống. Công nghệ này giúp kiểm soát tỷ lệ nhiên liệu chính xác hơn, cải thiện hiệu suất đốt cháy và giảm lượng khí thải độc hại như CO, HC và NO_x [2]. Tuy nhiên, hiệu quả kiểm soát khí thải của hệ thống FI phụ thuộc lớn vào tình trạng kỹ thuật của xe, đặc biệt là tuổi đời và chế độ bảo dưỡng định kỳ.

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chỉ ra rằng, tuổi đời và quãng đường sử dụng của xe máy có mối liên hệ chặt chẽ với mức độ phát thải. Cụ thể, nghiên cứu tại Đài Loan cho thấy, xe máy có tuổi đời cao thường có tỷ lệ không đạt tiêu chuẩn khí thải cao hơn, đặc biệt là ở các khu vực có hệ thống kiểm định và bảo dưỡng kém phát triển [3]. Tại Việt Nam, nghiên cứu của Nguyễn Yến Liên và cộng sự [4] cho thấy lượng phát thải CO, CO_2, HC và NO_x tăng đáng kể theo thời gian sử dụng xe máy phun xăng điện tử, đặc biệt trong điều kiện vận hành không tải.

Bên cạnh đó, chế độ bảo dưỡng định kỳ đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì hiệu quả hoạt động của hệ thống FI và hệ thống xử lý khí thải. Theo kết quả nghiên cứu của Kean et al. [5], những xe máy không được bảo dưỡng định kỳ có mức phát thải cao gấp 1,5-3 lần so với xe được bảo dưỡng thường xuyên. Một nghiên cứu khác của Czerwinski et al. [6] cũng chỉ ra rằng việc bảo trì định kỳ hệ thống lọc khí và bugi giúp giảm đáng kể nồng độ khí HC và CO trong khí thải.

Tuy nhiên, thực tế tại Việt Nam cho thấy người dân thường có xu hướng ít quan tâm đến việc bảo dưỡng định kỳ, đặc biệt là sau 3-5 năm sử dụng xe. Việc thiếu các chính sách khuyến khích hoặc bắt buộc kiểm tra khí thải định kỳ càng khiến vấn đề phát thải từ xe máy trở nên nghiêm trọng hơn [7].

Mặc dù đã có một số nghiên cứu liên quan [5-9], nhưng hiện nay vẫn thiếu các nghiên cứu thực nghiệm đánh giá cụ thể mối quan hệ giữa tuổi đời xe, chế độ bảo dưỡng và ☞

mức độ phát thải của xe máy phun xăng điện tử trong điều kiện thực tế tại Việt Nam. Việc làm rõ vấn đề này là cần thiết nhằm cung cấp dữ liệu thực tế cho cơ quan quản lý, đồng thời nâng cao nhận thức cộng đồng về tầm quan trọng của bảo dưỡng xe trong việc bảo vệ môi trường.

Từ thực tế đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá định lượng ảnh hưởng của tuổi đời xe và chế độ bảo dưỡng đến chất lượng phát thải của xe máy phun xăng điện tử đang lưu hành tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu sẽ góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho các giải pháp quản lý khí thải xe máy, đồng thời hỗ trợ xây dựng chính sách kiểm soát ô nhiễm không khí hiệu quả hơn trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng.

2. ĐỐI TƯỢNG THỬ VÀ PHƯƠNG PHÁP THỬ NGHIỆM

2.1. Đối tượng thử nghiệm

Trong nghiên cứu này, tác giả lựa chọn 176 xe máy sử dụng hệ thống phun xăng điện tử (Fuel Injection – FI) có dung tích xi lanh từ 50 cm^3 đến 125 cm^3 – nhóm xe phổ biến trên thị trường Việt Nam – để tiến hành đo lường và đánh giá mức phát thải khí thải. Các xe được phân chia thành năm nhóm theo thời gian sử dụng và quãng đường đã vận hành, bao gồm: dưới 3 năm sử dụng (dưới 30.000 km), từ 3 đến dưới 5 năm (30.000 – 50.000 km), từ 5 đến dưới 7 năm (50.000 – 70.000 km), từ 7 đến dưới 10 năm (70.000 – 100.000 km) và trên 10 năm sử dụng (trên 120.000 km). Việc phân nhóm nhằm phản ánh rõ ràng mức độ hao mòn của động cơ và hệ thống kiểm soát khí thải theo thời gian sử dụng. Mẫu xe được lựa chọn đảm bảo tính đại diện cho hiện trạng xe máy đang lưu hành thực tế tại Việt Nam, từ đó làm cơ sở đánh giá mối liên hệ giữa tuổi đời xe và mức độ phát thải khí CO, HC trong điều kiện vận hành không tải theo Tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia.

2.2. Phương pháp thử nghiệm

Thử nghiệm được thực hiện theo phương pháp đối chứng, so sánh mức phát thải khí CO và HC trước và sau khi bảo dưỡng trên các xe máy phun xăng điện tử (FI) có tuổi đời khác nhau. Trước khi bảo dưỡng, xe được giữ nguyên hiện trạng kỹ thuật và tiến hành đo khí thải theo quy trình quy định trong TCVN 11215:2015. Sau đó, xe được thực hiện bảo dưỡng với các hạng mục bao gồm: thay bugi, lọc gió và dầu bôi trơn. Việc thay thế toàn bộ hay từng bộ phận phụ thuộc vào tình trạng sử dụng thực tế của xe; các bộ phận vẫn còn trong giới hạn khuyến nghị của nhà sản xuất sẽ được giữ nguyên.

Sau bảo dưỡng, xe được làm nóng động cơ theo yêu cầu trong TCVN 11215:2015, tức là chạy không tải trong tối thiểu 15 phút hoặc di chuyển ít nhất 5 km, đồng thời đảm bảo nhiệt độ dầu bôi trơn trong bình chứa đạt tối thiểu 328 K. Tốc độ không tải được hiệu chỉnh về giá trị quy định của nhà sản xuất để đảm bảo tính nhất quán trong phép đo.

Trong quá trình đo phát thải, bướm ga được đặt ở vị trí không tải. Xe được đặt trên bề mặt phẳng ổn định và đầu lấy mẫu khí thải được đưa sâu tối thiểu 600 mm vào ống xả, nhằm ngăn không khí bên ngoài xâm nhập vào hệ thống trong suốt quá trình đo. Tất cả các phép đo đều tuân thủ nghiêm ngặt quy định về điều kiện và thiết bị đo theo tiêu chuẩn TCVN 11215:2015, nhằm đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy của kết quả.

3. THIẾT BỊ, NHIÊN LIỆU THỬ NGHIỆM

3.1. Thiết bị đo khí thải ở chế độ không tải

Thiết bị phân tích khí thải Ditest gas 1000 của AVL được sử dụng để đo phát thải CO và HC ở chế độ không tải, nguyên lý đo CO, HC bằng tia hồng ngoại, thiết bị được hiệu chuẩn theo đúng quy định của nhà sản xuất, với độ chính xác của bộ phân tích CO và HC lần lượt là ±0,01% thể tích và ±1 ppm thể tích.

3.2. Nhiên liệu thử nghiệm

Nhiên liệu sử dụng là nhiên liệu của xe khi mang đến thử nghiệm, nhiên liệu này được bán phổ biến ở các cây xăng hiện này, nhiên liệu được giữ cố định trong suốt quá trình thử nghiệm.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Số lượng mẫu, chủng loại và tuổi đời của xe

Bảng 1 chỉ ra số lượng mẫu tham gia đo kiểm khí thải. Tổng số 176 xe máy sử dụng hệ thống phun xăng điện tử (FI) đã được lựa chọn làm mẫu thử nghiệm trong nghiên cứu này. Các xe được phân nhóm theo tuổi đời sử dụng nhằm đảm bảo tính đại diện và phản ánh đầy đủ mức độ hao mòn theo thời gian. Cụ thể, nhóm xe dưới 3 năm sử dụng (dưới 30.000 km) chiếm 25 xe, tương đương 14,2% tổng số mẫu; nhóm từ 3 đến dưới 5 năm (30.000 – 50.000 km) có 40 xe (22,7%); nhóm từ 5 đến dưới 7 năm (50.000 – 70.000 km) có 40 xe (22,7%); nhóm từ 7 đến dưới 10 năm (70.000 – 100.000 km) cũng gồm 40 xe (22,7%); và nhóm trên 10 năm sử dụng (trên 120.000 km) chiếm 31 xe, tương đương 17,6%.

Phân bố mẫu thử nghiệm cho thấy cấu trúc hợp lý và cân đối, trong đó các nhóm xe có thời gian sử dụng từ 3 đến dưới 10 năm đều có số lượng tương đương, đảm bảo điều kiện so sánh khách quan giữa các giai đoạn tuổi thọ trung hạn. Nhóm xe mới (dưới 3 năm) tuy chiếm tỷ lệ thấp hơn, nhưng vẫn cung cấp cơ sở đánh giá ban đầu về hiệu suất vận hành và phát thải của các phương tiện còn mới. Ngược lại, nhóm xe sử dụng trên 10 năm phản ánh hiện trạng một bộ phận không nhỏ phương tiện cũ vẫn đang lưu hành, có nguy cơ phát thải cao nếu không được bảo dưỡng định kỳ. Cấu trúc phân bố này góp phần nâng cao độ tin cậy cho các phân tích tiếp theo về ảnh hưởng của tuổi đời xe đến chất lượng phát thải trong điều kiện vận hành không tải.

Bảng 1. Số lượng mẫu thử nghiệm ở chế độ không tải

Thời gian (năm)		Tổng số xe (chiếc)
Tuổi đời xe máy FI	> 10	31
	7 < x ≤ 10	40
	5 < x ≤ 7	40
	3 < x ≤ 5	40
	≤ 3	25
Tổng số xe		176

4.2. Đánh giá phát thải xe máy phun xăng điện tử trước bảo dưỡng theo năm sử dụng

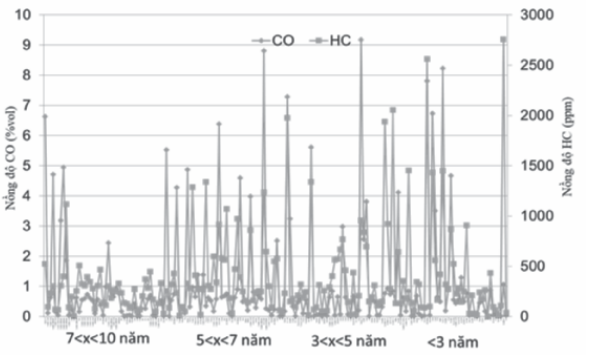
Hình 2 thể hiện sự biến thiên của nồng độ khí CO (carbon monoxide) và HC (hydrocarbon) trong khí thải của 176 xe máy phun xăng điện tử (FI) trước khi bảo dưỡng, được phân loại theo tuổi đời sử dụng. Mỗi điểm dữ liệu tương ứng với một xe trong mẫu nghiên cứu, được chia theo nhóm tuổi đời: ≤ 3 năm, 3-5 năm, 5-7 năm, 7-10 năm và > 10 năm. ☞

Nồng độ CO (đường màu xanh) cho thấy sự phân bố tương đối rộng, với nhiều giá trị vượt ngưỡng 2% thể tích – giới hạn cho phép đối với xe máy theo một số tiêu chuẩn khí thải hiện hành. Đáng chú ý, xe trong nhóm tuổi đời từ 7 năm trở lên có xu hướng xuất hiện nhiều điểm dữ liệu với giá trị CO cao bất thường, cho thấy dấu hiệu rõ rệt của sự suy giảm hiệu suất đốt cháy và kiểm soát nhiên liệu.

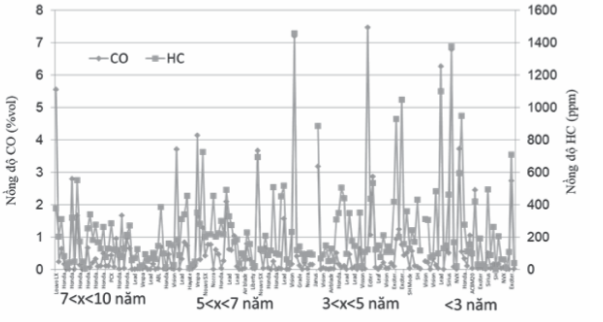
Nồng độ HC (đường màu cam) cũng thể hiện xu hướng tương tự, với sự gia tăng đáng kể về tần suất và biên độ dao động trong các nhóm xe có tuổi đời cao. Những xe trên 7 năm, đặc biệt là nhóm > 10 năm, ghi nhận nhiều trường hợp có nồng độ HC vượt 1500 ppm, phản ánh tình trạng cháy không hoàn toàn do mòn động cơ, bẩn bugi, hoặc bộ lọc gió bị tắc nghẽn.

Tổng thể, dữ liệu cho thấy mối tương quan rõ rệt giữa tuổi đời sử dụng của xe và mức độ ô nhiễm khí thải trước khi bảo dưỡng. Các nhóm xe có tuổi đời cao (trên 7 năm) có xu hướng phát thải cao hơn đáng kể cả về CO và HC so với các nhóm xe mới hơn (dưới 5 năm). Điều này củng cố giả thuyết rằng hiệu suất hệ thống nhiên liệu – đốt cháy của xe FI giảm đáng kể theo thời gian nếu không được bảo dưỡng định kỳ.

Kết quả này làm rõ tầm quan trọng của việc bảo trì định kỳ đối với xe máy phun xăng điện tử, đặc biệt khi xe đã qua sử dụng nhiều năm. Đồng thời, nó cũng cung cấp cơ sở khoa học để đề xuất các chính sách kiểm tra khí thải định kỳ bắt buộc nhằm kiểm soát ô nhiễm không khí do xe hai bánh tại các đô thị lớn.



Hình 2. Nồng độ CO và HC của xe máy phun xăng điện tử trước bảo dưỡng theo tuổi đời xe



Hình 3. Nồng độ CO và HC của xe máy phun xăng điện tử sau bảo dưỡng theo tuổi đời xe

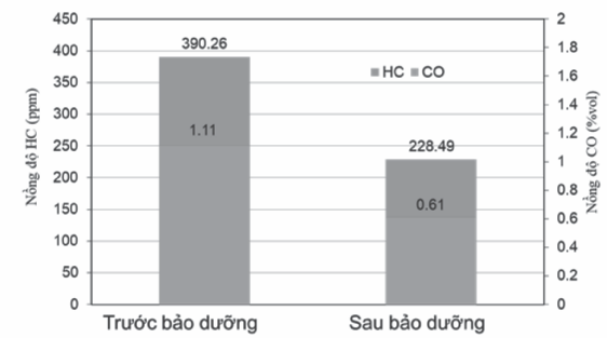
Hình 3 thể hiện mức phát thải khí CO (carbon monoxide) và HC (hydrocarbon) sau khi bảo dưỡng trên 176 xe máy phun xăng điện tử, được phân loại theo các nhóm tuổi đời sử dụng khác nhau. Các xe được đo trong điều kiện vận hành không tải sau khi đã thực hiện bảo dưỡng định kỳ bao gồm thay thế hoặc kiểm tra bugi, lọc gió và dầu bôi trơn theo khuyến cáo kỹ thuật.

Sau bảo dưỡng, nồng độ CO (đường biểu diễn màu xanh) giảm rõ rệt so với trước đó, đặc biệt ở các nhóm xe có tuổi đời trung bình và cao (trên 5 năm). Mức phát thải CO được phân bố hẹp hơn, với phần lớn các giá trị nằm dưới ngưỡng 2% thể tích, cho thấy hiệu quả cải thiện khả năng đốt cháy và kiểm soát hỗn hợp nhiên liệu – không khí trong buồng đốt.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Tương tự, nồng độ HC (đường màu cam) cũng ghi nhận xu hướng giảm đáng kể. Các giá trị cực trị cao xuất hiện rải rác trước đó đã được khống chế, cho thấy tình trạng cháy không hoàn toàn đã được khắc phục phần nào nhờ vệ sinh hệ thống nạp – xả và cải thiện đánh lửa. Đặc biệt ở nhóm xe trên 7 năm sử dụng – vốn có nguy cơ phát thải cao – nồng độ HC sau bảo dưỡng đã được hạ xuống mức gần tương đương với các nhóm xe trẻ hơn, thể hiện tác động tích cực rõ rệt của can thiệp kỹ thuật.

Tổng thể, dữ liệu cho thấy hiệu quả rõ ràng của bảo dưỡng định kỳ trong việc giảm phát thải khí độc hại đối với xe máy phun xăng điện tử ở mọi nhóm tuổi đời. Hiệu quả này càng trở nên rõ rệt ở các nhóm xe đã qua sử dụng lâu năm, nơi mà sự xuống cấp của động cơ và hệ thống nhiên liệu gây ảnh hưởng mạnh đến hiệu suất vận hành.



Hình 4. Nồng độ trung bình của CO và HC của xe máy phun xăng điện tử trước và sau bảo dưỡng

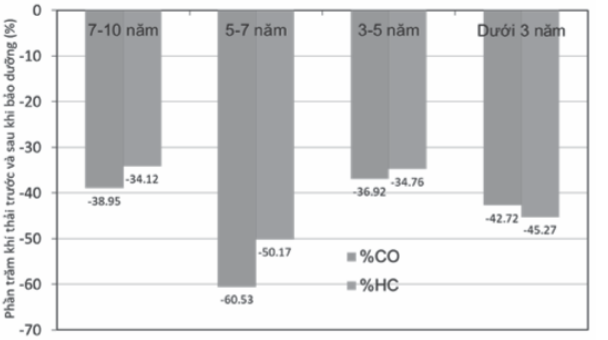
Hình 4 thể hiện giá trị nồng độ trung bình của hai thành phần khí thải chính là CO (carbon monoxide) và HC (hydrocarbon) trong khí thải của 176 xe máy phun xăng điện tử, được đo trong điều kiện vận hành không tải trước và sau khi bảo dưỡng.

Kết quả cho thấy có sự cải thiện rõ rệt về mức độ phát thải sau khi xe được thực hiện bảo dưỡng định kỳ. Cụ thể:

• Trước bảo dưỡng, nồng độ trung bình CO đạt mức 1,11% thể tích, trong khi HC trung bình đạt 282 ppm. Đây là các giá trị tương đối cao, đặc biệt là với xe đã qua sử dụng nhiều năm, cho thấy hiệu suất đốt cháy kém, có thể do tình trạng bẩn lọc gió, bugi mòn hoặc dầu bôi trơn xuống cấp.

• Sau bảo dưỡng, nồng độ CO giảm xuống còn 0,61%, tương ứng mức giảm khoảng 45% so với trước đó. Đồng thời, nồng độ HC cũng giảm mạnh xuống mức 204 ppm, tương đương mức giảm gần 28%.

Sự cải thiện đồng thời ở cả hai thành phần khí thải cho thấy hiệu quả tổng thể của các hoạt động bảo dưỡng như thay bugi, lọc gió và dầu bôi trơn – các yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình cháy và làm sạch khí xả. Việc giảm nồng độ CO phản ánh quá trình đốt cháy nhiên liệu được cải thiện rõ rệt, trong khi sự giảm nồng độ HC cho thấy lượng nhiên liệu chưa cháy bị phát thải ra môi trường đã được hạn chế đáng kể.



Hình 5. Hiệu quả giảm CO và HC của xe máy phun xăng điện tử sau bảo dưỡng theo tuổi đời của xe

Hình 5 thể hiện mức độ giảm trung bình nồng độ CO và HC trong khí thải của xe máy phun xăng điện tử sau khi thực hiện bảo dưỡng, được phân theo từng nhóm tuổi đời xe. Giá trị thể hiện trên trục tung là mức chênh lệch giữa ☞

trước và sau bảo dưỡng, với giá trị âm biểu thị mức giảm nồng độ chất ô nhiễm. Kết quả phân tích cho thấy hiệu quả bảo dưỡng có sự khác biệt rõ rệt giữa các nhóm tuổi đời xe: Nhóm xe 5-7 năm sử dụng đạt hiệu quả giảm cao nhất ở cả hai khí thải. Nồng độ CO giảm mạnh nhất, tiếp theo là HC, phản ánh tình trạng hệ thống đốt cháy và cung cấp nhiên liệu đã xuống cấp nhưng vẫn còn khả năng cải thiện tốt khi được bảo dưỡng đúng cách. Nhóm 7-10 năm cũng ghi nhận mức giảm đáng kể, đặc biệt đối với CO. Điều này cho thấy mặc dù hệ thống đã có dấu hiệu lão hóa, việc can thiệp bảo dưỡng vẫn đem lại hiệu quả đáng kể trong việc giảm phát thải. Nhóm 3-5 năm ghi nhận mức giảm vừa phải đối với cả CO và HC, cho thấy các xe trong giai đoạn trung niên vẫn có thể cải thiện hiệu suất đốt cháy thông qua bảo dưỡng định kỳ, dù mức độ không mạnh như nhóm trên. Nhóm xe mới (dưới 3 năm) có mức giảm thấp nhất, gần như không đáng kể, phù hợp với thực tế rằng các xe còn mới thường vẫn đang hoạt động ở trạng thái tối ưu, hệ thống nhiên liệu – đánh lửa còn trong giới hạn thiết kế nên hiệu quả bảo dưỡng không quá rõ rệt.

Kết quả cũng cho thấy rằng hiệu quả của bảo dưỡng trong việc giảm nồng độ CO và HC tỷ lệ thuận với tuổi đời của xe. Xe càng cũ, hiệu quả bảo dưỡng càng rõ rệt, phản ánh quá trình phục hồi chức năng của các bộ phận đã suy giảm như bugi, lọc gió, hoặc dầu bôi trơn sau thời gian dài sử dụng.

Kết quả này đồng thời nhấn mạnh vai trò thiết yếu của bảo dưỡng định kỳ, đặc biệt với xe đã sử dụng trên 5 năm, trong việc kiểm soát phát thải khí độc hại từ xe máy – một nguồn ô nhiễm lớn tại các đô thị. Cơ sở dữ liệu này có thể hỗ trợ hoạch định chính sách về kiểm tra – bảo dưỡng xe máy định kỳ nhằm giảm thiểu ô nhiễm không khí tại Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành đo lường và phân tích mức phát thải khí CO và HC của 176 xe máy phun xăng điện tử có tuổi đời từ dưới 3 năm đến trên 10 năm trong điều kiện vận hành không tải, trước và sau khi thực hiện bảo dưỡng định kỳ. Kết quả cho thấy mối tương quan rõ rệt giữa tuổi đời của phương tiện và mức độ phát thải, với các xe đã qua sử dụng lâu năm (trên 7 năm) có xu hướng phát thải khí CO và HC cao hơn đáng kể so với các xe mới hơn.

Trước bảo dưỡng, nồng độ trung bình của CO và HC lần lượt đạt 1,11% thể tích và 282 ppm, nhiều trường hợp vượt ngưỡng tiêu chuẩn cho phép. Sau khi thực hiện các hạng mục bảo dưỡng cơ bản (thay bugi, lọc gió và dầu bôi trơn), nồng độ CO giảm còn 0,61%, tương đương mức giảm 45%, trong khi HC giảm xuống còn 204 ppm, tức giảm khoảng 28%. Đáng chú ý, hiệu quả cải thiện phát thải sau bảo dưỡng thể hiện rõ nhất ở các nhóm xe trên 7 năm sử dụng.

Kết quả nghiên cứu khẳng định vai trò quan trọng của bảo dưỡng định kỳ đối với việc duy trì hiệu suất vận hành và giảm phát thải ô nhiễm của xe máy phun xăng điện tử. Đồng thời, nghiên cứu cung cấp dữ liệu thực nghiệm làm cơ sở cho việc xây dựng các chính sách kiểm soát khí thải và khuyến nghị về chương trình bảo dưỡng xe máy tại Việt Nam, đặc biệt trong bối cảnh ô nhiễm không khí đô thị ngày càng nghiêm trọng.❖

Ngày nhận bài: **15/4/2025**
Ngày phản biện: **12/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bộ Giao thông Vận tải (2021), Báo cáo hiện trạng giao thông đô thị Việt Nam.

[2]. Chang, C. C., & Yeh, C. T. (2006), "*Motor vehicle emissions in Taiwan*". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 11(2), 101-107.

[3]. Hsieh, W. D., Chen, R. H., Wu, T. L., & Lin, T. H. (2002), "*Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels*". Atmospheric Environment, 36(3), 403-410.

[4]. Nguyễn Yến Liên, Phạm Thị Thu Huyền, & Lê Minh Hòa. (2021), "*A study on emission and fuel consumption of motorcycles in idle mode and the impacts on air quality in Hanoi, Vietnam*". Journal of Vietnamese Environmental Studies, 5(2), 25-34.

[5]. Kean, A. J., Harley, R. A., & Kendall, G. R. (2003), "*Effects of vehicle speed and engine load on motor vehicle emissions*". Environmental Science & Technology, 37(17), 3739-3746.

[6]. Czerwinski, J., Zimmerli, Y., & Mayer, A. (2011), "*Emissions of 2-wheel vehicles: influence of technology, fuel, and maintenance*". SAE Technical Paper, 2011-24-0180.

[7]. Nguyễn Văn Hùng, Trần Quốc Dũng, & Lê Thị Thanh (2019), "*Thực trạng và giải pháp kiểm soát phát thải xe máy tại Việt Nam*". Tạp chí Giao thông Vận tải, 8, 45-49.

[8]. Chan, L., Dong, G., & Leung, M. (2012), "*Roadside vehicle emission measurement in Hong Kong*". Environmental Monitoring and Assessment, 184, 5085-5099.

[9]. Lyu, N., Wang, M., Xie, P., & Wang, Y. (2018), "*Impact of aging on motorcycle emissions*". Transportation Research Part D, 65, 563-573.

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PD CHO HỆ PHI TUYẾN VÀ NHIỀU BIẾN ỨNG DỤNG CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP

DESIGN OF A PD CONTROLLER FOR NONLINEAR - MULTIVARIABLE SYSTEM, APPLICATIONS TO INDUSTRIAL ROBOT

Nguyễn Trường Giang*, Nguyễn Hồng Lĩnh
Khoa Cơ khí – Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện Lực
**Email: giangnt1@epu.edu.vn*

TÓM TẮT

Các loại robot hiện nay đang được nhiều người quan tâm nghiên cứu và phát triển. Robot ngày càng thông minh, đảm nhận thay thế những công việc mà con người không thể thực hiện như: làm việc trong môi trường có tia phóng xạ, giải cứu con người trong hỏa hoạn, thu thập các thông số của môi trường ở những nơi khắc nghiệt... Việc thiết kế được bộ điều khiển phù hợp đáp ứng được yêu cầu cao về tốc độ điều khiển và độ chính xác điều khiển đóng vai trò quan trọng. Nội dung của nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng bộ điều khiển tỷ lệ-vi phân (PD) cho hệ phi tuyến và nhiều biến. Mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR) được sử dụng như một cơ hệ phi tuyến và nhiều biến để thực hiện việc thiết kế bộ điều khiển PD tổng quát.

Từ khóa: *Điều khiển Robot; Hệ phi tuyến; Hệ nhiều biến; Matlab Simulink.*

ABSTRACT

Robots are the focus of extensive research and development. Robots are becoming increasingly intelligent, enabling them to perform tasks that humans cannot, for example, operating in radioactive environments, rescuing people from fires, and collecting environmental data in extreme conditions. Achieving these capabilities hinges on controllers that can deliver both high speed response and high positional accuracy. This study therefore develops a proportional-derivative (PD) control scheme for nonlinear, multivariable systems. As a representative case, an industrial robot with two rotary (RR) joints is modeled and used to demonstrate the design and implementation of the proposed PD controller.

Keywords: *Robot controller; Nonlinear system; Multivariable system; Matlab Simulink.*

1. TỔNG QUAN

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển của công nghệ và các hệ thống máy móc hiện đại, các robot đang không ngừng phát triển về số lượng cũng như khả năng của chúng. Robot ngày càng thông minh, đảm nhận thay thế những công việc mà con người không thể thực hiện như: làm việc trong môi trường có tia phóng xạ, giải cứu con người trong hỏa hoạn, thu thập các thông số của môi trường ở những nơi khắc nghiệt.... Các loại robot ngày càng linh hoạt hơn do chúng được điều khiển bởi bộ xử lý trung tâm được tích hợp thêm các bộ điều khiển thông minh.

Việc nghiên cứu, tìm hiểu chuyên sâu về robot và phương pháp điều khiển robot đòi hỏi người nghiên cứu có những kiến thức sâu về lĩnh vực cơ khí, điện tử, công nghệ thông tin. Năm 2015, Hoàng Xuân Vinh [1] đã mô phỏng và thực nghiệm điều khiển robot song song Hexapod 6 bậc tự do với các giải thuật điều khiển PID, điều khiển mờ trực tiếp (Direct Fuzzy - PD), điều khiển tự chỉnh định Fuzzy – PID cho từng khâu dẫn động. Năm 2021, Trần Xuân Tình và đồng nghiệp đã thực hiện việc xây dựng bộ điều khiển tốc độ cho hệ nhiều động cơ bằng phương pháp điều khiển cuốn chiếu. Các tác giả đã xây dựng mô hình cơ hệ, tìm luật điều khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab/ Simulink [2]. Năm 2022, Phạm Đình Bá và Phan Văn Dương đã thiết kế bộ điều khiển PID để giải quyết bài toán bám quỹ đạo của robot di động với 3 bánh xe đa hướng. Bộ điều khiển đã được đánh giá thông qua việc sử dụng phần mềm Matlab/Simulink [3].

Tuy nhiên, việc tập trung xây dựng bộ điều khiển cho hệ phi tuyến và nhiều biến chưa được nhiều nghiên cứu đề cập đến. Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và nhiều biến đã được thiết kế và ứng dụng cho mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR). Các hệ số K_{P1}, K_{P2}, K_{D1} và K_{D2} được xác định thông qua việc sử dụng Simulink Design Optimization Toolbox của phần mềm Matlab với mục tiêu sai số nhỏ nhất, thời gian quá độ ngắn nhất. Với bộ điều khiển PD đã thiết kế, các giá trị góc của 2 khớp sẽ tiệm cận quỹ đạo chuyển động cho trước với sai số nhỏ.

2. PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ROBOT CÔNG NGHIỆP

Trong thực tế, phương trình động lực học của Robot công nghiệp thường là các phương trình phức tạp, phi tuyến và nhiều biến. Trong nghiên cứu này, bài toán điều khiển Robot công nghiệp được xem xét với mô hình điều khiển phi tuyến và nhiều biến. Phương trình động lực học tổng quát của Robot công nghiệp có thể được thiết lập như sau:

$$\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{n} J_{ij}\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^{n} C_{ij}\dot{q}_j + G_i + F_{fi} + F_{exi} = F_i \\ &J_{mi}\ddot{\theta}_{mi} + \left(B_{mi} + K_{bi}K_{mi}/R_i\right)\dot{\theta}_{mi} = \left(K_{mi}/R_i\right)V_i - F_i/r_i\end{aligned} \quad (1)$$

Sau một số phép biến đổi với chú ý $\theta_{mi} = r_i q_i$, ta đưa phương trình (1) về dạng sau:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + B\dot{q} + G(q) + F_f(\dot{q}) + F_{ex} = u \quad (2)$$

Trong đó:

$M(q) = J(q) + J_m$ với J_m là ma trận đường chéo với các phần tử $r_i^2 J_{mi}$;

B là ma trận đường chéo với các phần tử $B_{mi} + K_{bi}K_{mi} / R_i$;

u là vector tín hiệu vào với các phần tử $u_i = \frac{r_i K_{mi}}{R_i} V_i$ có thứ nguyên của moment. ☞

3. LÝ THUYẾT XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PD CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP

Bộ điều khiển PD để điều khiển vị trí được thiết lập để điều khiển cho Robot công nghiệp trong trường hợp tổng quát với luật điều khiển như sau:

$$u = K_P\tilde{q} - K_D\dot{q} \quad (3)$$

Trong đó, $\tilde{q} = q^d - q$ là vector sai số giữa chuyển vị mong muốn q^d và chuyển vị thực của khớp q. K_P, K_D tương ứng là ma trận đường chéo của các hệ số tỉ lệ và vi phân. Để đánh giá sai số trong trạng thái xác lập của bộ điều khiển, ta sử dụng tiêu chuẩn đánh giá Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} + \frac{1}{2}\tilde{q}^T K_P\tilde{q} \quad (4)$$

Nhóm thứ nhất trong phương trình (4) là động năng của Robot công nghiệp và nhóm thứ hai đại diện cho thành phần phản hồi hữu tỉ $K_P\tilde{q}$. Trong phương trình (4), V chính là tổng động năng của cơ hệ ở vị trí cân bằng q^d mà khi thay các cơ cấu chấp hành của các khớp bằng các lò xo với độ cứng biểu diễn bởi ma trận K_P. Khi đó, V là một hàm không âm và V = 0 khi q = q^d và $\dot{q} = 0$. Điều này chứng tỏ rằng với một vị trí xác định nào đó cho trước thì V sẽ tiến tới 0 hay nói cách khác là Robot công nghiệp có thể chuyển động tới một vị trí bất kỳ cho trước. Để chứng minh cho điều này, ta đạo hàm hai vế của phương trình (4) theo thời gian, với chú ý J_m và q^d là hằng số, ta có:

$$\dot{V} = \dot{q}^T M(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{q}^T \dot{J}(q)\dot{q} - \dot{q}^T K_P\tilde{q} \quad (5)$$

Trước hết, để đơn giản bài toán, chúng ta giả thiết B = 0, G(q) = 0, $F_f(\dot{q}) = 0$, và F_{ex} = 0 trong phương trình (2). Từ đó, ta có:

$$M(q)\ddot{q} = u - C(q,\dot{q})\dot{q} \quad (6)$$

Từ phương trình (5) và (6), ta có:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{q}^T\left[u - C(q,\dot{q})\dot{q}\right] + \frac{1}{2}\dot{q}^T\dot{J}(q)\dot{q} - \dot{q}^T K_P\tilde{q} \\ &= \dot{q}^T\left[u - K_P\tilde{q}\right] + \frac{1}{2}\dot{q}^T\left[\dot{J}(q) - 2C(q,\dot{q})\right]\dot{q}\end{aligned} \quad (7)$$

Hoàn toàn có thể chứng minh được $\dot{q}^T\left[\dot{J}(q) - 2C(q,\dot{q})\right]\dot{q} = 0$ nên, ta có:

$$\dot{V} = \dot{q}^T\left[u - K_P\tilde{q}\right] \quad (8)$$

Thế luật điều khiển trong phương trình (3) vào phương trình (8), ta có:

$$\dot{V} = -\dot{q}^T K_D\dot{q} \le 0 \quad (9)$$

Việc phân tích ở trên chứng tỏ rằng V luôn giảm khi $\dot{q} \ne 0$ và Robot công nghiệp sẽ tiếp cận tới một vị trí cân bằng nào đó khi $\dot{V} = 0 \to \dot{q} = 0$ khi đó $\ddot{q} = 0$. Từ phương trình chuyển động kết hợp với điều khiển PD, ta có:

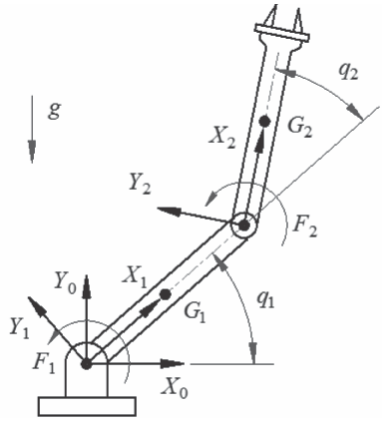
$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} = -K_P\tilde{q} - K_D\dot{q} \to -K_P\tilde{q} = 0 \quad (10)$$

Phương trình (10) hàm ý rằng khi $\dot{q} = 0$ thì $\tilde{q} = 0$ hay q = q^d. Theo định lý LaSalle thì sự cân bằng này là ổn định tiệm cận.

4. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PD CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP RR

Trong nghiên cứu này, mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR) được sử dụng như một cơ hệ phi tuyến và nhiều biến để thực hiện việc thiết kế bộ điều khiển PD tổng quát. Mô hình Robot công nghiệp RR (Robot RR) được mô tả như trên Hình 1 với các thông số kỹ thuật được lựa chọn như trong Bảng 1.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



Hình 1. Robot công nghiệp RR

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của mô hình Robot công nghiệp RR

Khối lượng các khâu: $m_1 = m_2 = 1$kg Chiều dài các khâu: $l_1 = l_2 = 1$m Điện trở phần ứng động cơ: R = 1Ω Moment quán tính phần ứng: $J_m = 1$kgm^2 Điện áp phần ứng: V = 10V	Hệ số sức phản điện động: $K_b = 1$Vs/rad Hệ số moment: $K_m = 1$Nm/A Tỉ số truyền từ động cơ đến các khớp: r = 100 Hệ số cản của cơ cấu dẫn động: $B_m = 1$Nms/rad Gia tốc trọng trường: g = 10m/s^2

Hệ phương trình vi phân chuyển động cho Robot RR được thiết lập như sau:

$$\left(\frac{m_1l_1^2+m_2l_2^2}{3}+m_2l_1^2+m_2l_1l_2cq_2\right)\ddot{q}_1+\left(\frac{m_2l_2^2}{3}+\frac{m_2l_1l_2cq_2}{2}\right)\ddot{q}_2-m_2l_1l_2sq_2\dot{q}_1\dot{q}_2$$
$$-\frac{m_2l_1l_2sq_2}{2}\dot{q}_2^2-\left(\frac{m_1}{2}+m_2\right)l_1gcq_1-\frac{m_2}{2}l_2gc(q_1+q_2)=F_{ex1} \quad (11)$$
$$\left(\frac{m_2l_2^2}{3}+\frac{m_2l_1l_2cq_2}{2}\right)\ddot{q}_1+\frac{m_2l_2^2}{3}\ddot{q}_2+\frac{m_2l_1l_2sq_2}{2}\dot{q}_1^2-\frac{m_2}{2}l_2gc(q_1+q_2)=F_{ex2}$$

Hệ phương trình 11 có thể được mô tả theo dạng phương trình (2) như sau:

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+B\dot{q}+G(q)+F_f(\dot{q})+F_{ex}=u \quad (12)$$

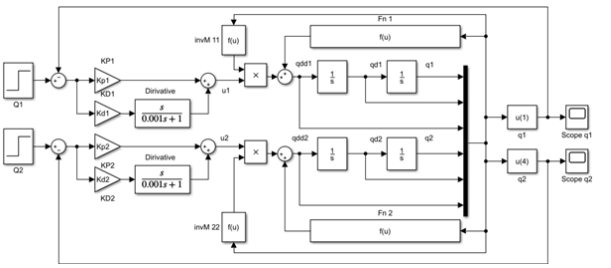
Trong đó:

$$M(q)=\begin{bmatrix}\frac{304}{3}+cq_2 & \frac{1}{3}+\frac{1}{2}cq_2\\ \frac{1}{3}+\frac{1}{2}cq_2 & \frac{301}{3}\end{bmatrix};C(q,\dot{q})=\begin{bmatrix}-sq_2\dot{q}_2 & -\frac{1}{2}sq_2\dot{q}_2\\ \frac{1}{2}sq_2\dot{q}_1 & 0\end{bmatrix}$$
$$B=\begin{bmatrix}2&0\\0&2\end{bmatrix};G(q)=\begin{bmatrix}-15cq_1-5c(q_1+q_2)\\ -5c(q_1+q_2)\end{bmatrix};F_f(\dot{q})=\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix};F_{ex}=\begin{bmatrix}0\\0\end{bmatrix}$$
$$u=\begin{bmatrix}K_{P1}&0\\0&K_{P2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}q_1-q_1^d\\ q_2-q_2^d\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}K_{D1}&0\\0&K_{D2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix}$$

Để thuận lợi hơn cho việc xây dựng mô hình bằng Matlab Simulink, phương trình (12) được biến đổi về dạng sau:

$$\ddot{q}=M^{-1}(q)\left[u-C(q,\dot{q})\dot{q}-B\dot{q}-G(q)-F_f(\dot{q})-F_{ex}\right]=M^{-1}(q)u+Fn \quad (13)$$

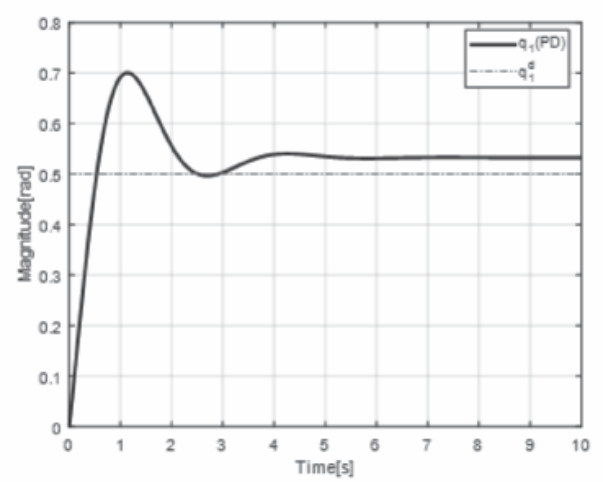
Giả thiết, thiết kế bộ điều khiển PD để điều khiển Robot tới vị trí $q_1 = 0.5$rad, $q_2 = 0.3$rad. Sơ đồ khối bộ điều khiển PD cho Robot RR được xây dựng trên phần mềm Matlab Simulink được mô tả như Hình 2. Các hệ số K_{P1}, K_{P2}, K_{DJ} và K_{D2} của bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và hai biến được xác định thông qua việc sử dụng Simulink Design Optimization Toolbox của phần mềm Matlab với mục tiêu sai số nhỏ nhất, thời gian quá độ ngắn nhất. Các hệ số tối ưu được xác định như sau: $K_{P1} = 500$, $K_{P2} = 500$, $K_{D1} = 200$ và $K_{D2} = 200$.



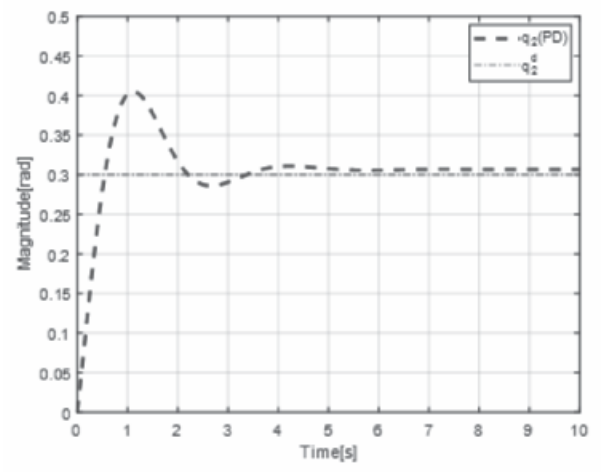
Hình 2. Sơ đồ khối bộ điều khiển PD cho Robot RR

Đáp ứng bước của bộ điều khiển PD cho Robot RR được mô tả chi tiết như Hình 3. Trên Hình 3 (a), đường nét liền thể hiện giá trị điều khiển thực tế của góc khớp 1 và đường chấm gạch thể hiện giá trị mong muốn. Trên ☞

Hình 3 (b), đường nét đứt thể hiện giá trị điều khiển thực tế của góc khớp 1 và đường chấm gạch thể hiện giá trị mong muốn. Kết quả mô phỏng đáp ứng bước của 2 khớp cho thấy, thời gian vọt lố (Peak time) xảy ra khoảng 1 giây, độ vọt lố (Overshoot) lên tới khoảng 33÷36% sau đó dao động nhẹ, giảm dần và ổn định sau khoảng 4 giây. Với bộ điều khiển PD, các giá trị góc của 2 khớp sẽ tiệm cận quỹ đạo chuyển động cho trước với sai số nhỏ.



a) Đáp ứng bước của khớp 1



b) Đáp ứng bước của khớp 2

Hình 3. Đáp ứng bước của bộ điều khiển PD cho Robot RR

4. KẾT LUẬN

Nội dung của nghiên cứu đã xây dựng được bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và nhiều biến. Mô hình Robot công nghiệp với 2 khớp quay (RR) được sử dụng như một cơ hệ phi tuyến và nhiều biến để thực hiện việc thiết kế bộ điều khiển PD tổng quát. Các hệ số K_{P1}, K_{P2}, K_{D1} và K_{D2} của bộ điều khiển PD cho hệ phi tuyến và hai biến được xác định thông qua việc sử dụng Simulink Design Optimization Toolbox của phần mềm Matlab với mục tiêu sai số nhỏ nhất, thời gian quá độ ngắn nhất. Với bộ điều khiển PD đã thiết kế, các giá trị góc của 2 khớp sẽ tiệm cận quỹ đạo chuyển động cho trước với sai số nhỏ. ❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**
Ngày phản biện: **28/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Xuân Vinh (2015), "*Tối ưu hóa thiết kế và điều khiển tay máy song song kiểu Stewart Gough Platform*". Luận án Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điện tử, Viện Nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa.

[2]. Trần Xuân Tình, Đặng Tiến Trung, Lê Văn Sâm, Nguyễn Ngọc Tuyến, "*Xây dựng bộ điều khiển tốc độ cho hệ nhiều động cơ bằng phương pháp điều khiển cuốn chiếu*". Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 25 (2021), 17-23.

[3]. Phạm Đình Bá và Phan Văn Dương, "*Mô hình toán học và thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo cho Robot di động sử dụng cơ cấu lái với 3 bánh xe đa hướng*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng, số 69 (01-2022), 45-50.

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN ĐỂ TẠO HÌNH BIÊN DẠNG ROTOR CIC BƠM ROOTS

DEVELOPING A MATHEMATICAL MODEL FOR GENERATING THE CIC ROTOR PROFILE OF A ROOTS PUMP

Phạm Đức Thiên*, Nguyễn Thanh Tùng
Trường Đại học Mỏ – Địa Chất
**Email: phamducthien@humg.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo tập trung vào xây dựng mô hình toán cho biên dạng rotor CIC (Circle – Involute - Circle) bơm Roots bằng cách tổ hợp các cung cong bao gồm cung tròn ở đỉnh rotor, cung thân khai ở sườn bên rotor và cung tròn ở đáy rotor. Dựa trên các phép biến đổi toán học và các ma trận chuyển đổi, phương trình toán học đoạn cung tròn đỉnh, đoạn cung thân khai cạnh và cung tròn đáy được hình thành. Bên cạnh đó, nội dung bài báo còn giải quyết các vấn đề về điều kiện liên tục các cung cong tại các điểm chuyển tiếp. Bằng sự hỗ trợ của ứng dụng Matlab, mô hình Rotor CIC kiểu 2, 3 và 4 cánh được hình thành. Kết quả của bài báo thể hiện tính đúng của mô hình toán và các điều kiện hình thành.

Từ khóa: *Bơm Roots; Thân khai; Cung tròn.*

ABSTRACT

This paper focus on developing a mathematical model for the rotor profile of a CIC (Circle – Involute - Circle) of Roots pump by combining a circular arc, an involute curve, and another circular arc. Based on mathematical transformations and transformation matrices, the governing equations for the circular arc and involute segments are formulated. In addition, the paper addresses continuity conditions at the transition points between the connected curves to ensure smoothness of the rotor profile. By using Matlab software, CIC rotor profiles with 2-lobe, 3-lobe, and 4-lobe configurations are successfully generated. The results confirm the correctness of the mathematical model and the validity of the geometric constraints applied.

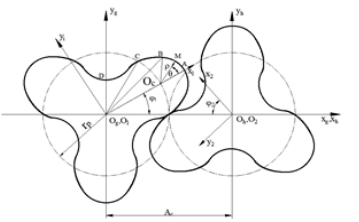
Keywords: *Roots pump; Involute rotor; Circle rotor.*

1. GIỚI THIỆU

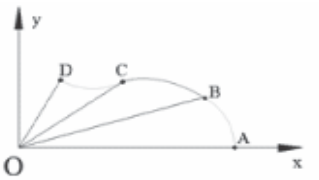
Bơm Roots (thuộc dòng bơm thể tích) thường được sử dụng để tạo môi trường chân không trong các ngành thực phẩm, đồ uống, hóa chất,… nhờ các ưu điểm như kết cấu đơn giản, lưu lượng lớn, dễ lắp ráp và chi phí bảo trì thấp [1]. Biên dạng cánh rotor là ảnh hưởng đến hiệu suất làm việc của bơm, do trạng thái chân không được hình thành bởi quá trình ăn khớp giữa cặp cánh rotor. Hiện nay, hướng nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào thiết kế biên dạng cánh rotor của bơm Roots để cải thiện hiệu suất bơm, đồng thời đảm bảo tính phù hợp với các công nghệ gia công hiện đại. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng các đường cong hình học cơ bản cùng với các điều kiện ràng buộc hình học để thiết kế biên dạng rotor Roots. Wang và cộng sự [2] sử dụng năm cung tròn để thiết kế biên dạng rotor và phân tích ảnh hưởng của các tham số thiết kế đến hiệu suất bơm. Nhóm tác giả Niimura và cộng sự [3] đề xuất biên dạng rotor gồm cung tròn và đường thân khai nhằm nâng cao hiệu suất bơm. Hsieh và Hwang [4, 5] sử dụng đường trochoid và hàm đa thức, hàm tỉ lệ trochoid biến thiên để thiết kế phần đỉnh rotor, đường cycloid mở rộng kết hợp đường trochoid biến thiên để tạo hình biên dạng cánh [6]. Ngoài ra, Hsieh [7] còn sử dụng đường elip để tạo hình biên dạng cánh rotor bơm có tính đến điều kiện cắt chân răng. Kang và Vu [8] đề xuất hai biên dạng rotor cho bơm Roots, gồm biên dạng ECE (epicycloidal-circular-epicycloidal) và CEC (circular-epicycloidal-circular). Gần đây, nhóm tác giả Wu và Tran [9] đề xuất biên dạng rotor mới gồm năm đoạn cong, bao gồm một đường involute, một cung tròn và đường đồng dạng của nó, một đường epicycloid và đường đồng dạng của nó. Các nghiên cứu trên đã đề cập việc thiết kế hình dạng rotor bơm Roots, tuy nhiên mỗi biên dạng đề xuất đều có những hạn chế nhất định. Nghiên cứu này đề xuất một mô hình toán học cho biên dạng rotor CIC mới. Biên dạng rotor mới gồm ba đoạn cong: cung tròn (Circle) - đường thân khai (Involute) - cung tròn (Circle). Từ cơ sở mô hình toán rotor CIC để thực hiện các nghiên chuyên sâu về loại rotor mới này.

2. XÂY DỰNG BIÊN DẠNG ROTOR CIC BƠM ROOTS

Như biểu diễn ở Hình 1, biên dạng CIC của rotor là được kết hợp bởi ba họ đường cong. Biên dạng rotor là đối xứng trục nên chỉ cần xác định cho một nửa biên dạng. Đoạn đường cong phần đỉnh rotor AB là một cung tròn có bán kính ρ được sử dụng để đảm bảo điều kiện khép kín với phần vỏ của bơm. Khe hở giữa phần đỉnh rotor và thành trong của vỏ bơm sẽ trở lên dài và hẹp hơn, việc này sẽ cho đường làm việc tốt hơn và cửa vào rộng hơn. Đoạn BC là một đường thân khai được sử dụng để ngăn chặn mòn bề mặt răng trên đường làm việc dọc theo đường tròn làm việc. Và cuối cùng là đoạn CD là một đường cung tròn đáy đối tiếp với cung tròn đỉnh của rotor đối tiếp.



(a) Biên dạng rotor CIC



(b) Đoạn biên dạng rotor CIC

Hình 1. Hệ tọa độ xây dựng mô hình toán rotor biên dạng CIC

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Để thiết lập phương trình toán cho mô hình biên dạng rotor mới CIC, ta chọn hệ trục tọa độ S_1 (O_1-x_1y_1) gắn trên rotor 1; hệ trục tọa độ S_2 (O_2-x_2y_2) gắn trên và rotor 2; hệ trục tọa độ S_g (O_g-x_gy_g) and S_h (O_h-x_hy_h) là hệ tọa độ chuyển động. Rotor và cánh rotor có tính đối xứng nên việc xây dựng biên dạng rotor được thực hiện trên đoạn cung cong CIC cơ sở (hình 1b), từ đó dựa trên các phép đối xứng, phép quay để thiết lập toàn bộ biên dạng rotor.

*Với đoạn cung tròn AB: Cung tròn AB có tâm O_c nằm trên đường tròn chia bán kính r_p, bán kính cong ρ, một điểm M trên tròn AB được xác định thông qua phương trình (1):

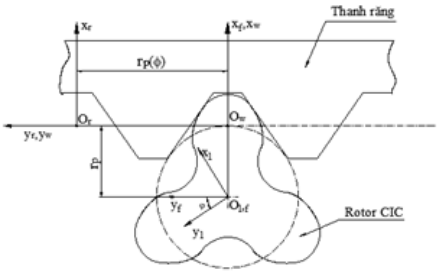
$$\mathbf{r}_{1,AB}(\theta)=\left[\left(R-r_p\right)\cos\theta+r_p,\left(R-r_p\right)\sin\theta,1\right]^T \quad (1)$$

Véc tơ pháp tuyến đơn vị của cung AB được xác định theo phương trình (2):

$$\mathbf{n}_{1,AB}(\theta)=\left(\frac{\partial\mathbf{r}_{1,AB}(\theta)}{\partial\theta}\times\mathbf{k}\right)^T \quad (2)$$

Trong đó, R và ρ là bán kính đường tròn qua đỉnh rotor và bán kính cung tròn AB, θ là góc tham số của cung tròn, giá trị $\theta_{min}\le\theta\le\theta_{max}$, k là véc tơ pháp tuyến đơn vị theo trục Z, T là ký hiệu ma trận chuyển vị. Cung tròn đỉnh AB này sẽ đối tiếp với cung tròn đáy của rotor đối tiếp.

*Với đoạn thân khai BC: Việc tạo hình biên dạng thân khai BC được xác định theo sơ đồ tạo hình đường thân khai như Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ tạo hình cho đường cong thân khai

Gọi hệ tọa độ S_r (O_r x_r y_r), S_1 ($O_1x_1y_1$) là hệ tọa độ cố định gắn với thanh răng và tâm bánh răng. Hệ tọa độ S_w ($O_wx_wy_w$), S_f (O_f x_f y_f) là hệ tọa độ chuyển động gắn tại tâm ăn khớp và tâm bánh răng. Quỹ tích các điểm trên biên dạng cung thân khai được xác định theo phương trình (3) và véc tơ pháp tuyến tại điểm đó được xác định bởi phương trình (4).

$$\mathbf{r}_{1,BC}(u,\alpha)=\Big[\left(r_p+u\cos\alpha\right)\cos\lambda-u\cos\alpha\cot\alpha\sin\lambda,$$
$$u\cos(\lambda-\alpha)\cot\alpha+r_p\sin\lambda,1\Big]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{t}_{1,BC}(u,\alpha)=\left[\frac{\partial x_{1,BC}}{\partial u},\frac{\partial y_{1,BC}}{\partial u}\right]^T \quad (4)$$

Trong đó: Tham số u của thanh răng được xác định bởi $-u_{bc}\le u\le u_{bc}$; α là góc áp lực; ϕ là tham số góc quay của bánh răng; W_p là bên dày thanh răng và được xác định $W_p=\frac{\pi r_p}{Z}$, Z là số răng; λ là góc phụ và được xác định bằng công thức: $\lambda=\frac{\pi}{2Z}-\frac{u\cos\alpha}{r_p}$.

Giữa cung tròn AB và cung thân khai BC nối với nhau tại điểm B. Để đảm bảo quá trình nối tiếp liên tục, chúng thỏa mãn ba điều kiện sau:

(1) Điều kiện liên tục về vị trí tại điểm B thể hiện qua phương trình (5):

$$f_{1,B}=\left(x_{AB}^2+y_{AB}^2\right)-\left(x_{BC}^2+y_{BC}^2\right)=0$$

$$f_{1,B}=\Big[\left(R-r_p\right)\cos\theta+r_p\Big]^2+\Big[\left(R-r_p\right)\sin\theta\Big]^2-$$
$$\Big[\left(r_p+u\cos\alpha\right)\cos\lambda-u\cos\alpha\cot\alpha\sin\lambda\Big]^2+\Big[u\cos(\lambda-\alpha)\cot\alpha+r_p\sin\lambda\Big]^2=0 \quad (5)$$

(2) Điều kiện liên tục về tiếp tuyến tại điểm B thể hiện qua phương trình (6):

$$f_{2,B} = \mathbf{n}_{1,AB}.t_{1,BC} = \left[\frac{\partial x_{1,BC}}{\partial u}, \frac{\partial y_{1,BC}}{\partial u}\right]^T . \left(\frac{\partial \mathbf{r}_{1,AB}(\theta)}{\partial \theta} \times \mathbf{k}\right)^T = 0 \quad (6)$$

(3) Điều kiện liên tục về độ cong của hai cung cong tại điểm B thể hiện qua phương trình (7):

$$f_{3,B} = \frac{\partial \mathbf{r}^2_{1,AB}(\theta)}{\partial \theta^2} - \frac{\partial \mathbf{r}^2_{1,BC}(u)}{\partial u^2} = 0 \quad (7)$$

*Với đoạn cung tròn CD: Cung tròn đáy CD của rotor thứ nhất sẽ đối tiếp với cung tròn đỉnh của rotor thứ hai. Điểm $M_2(x_2,y_2)$ trên cung lõm S_2 được xác định thông qua ma trận chuyển đổi M_{21}, ta có:

$$M_2 = M_{21}.M_1 = M_{2f}.M_{f1}.M_1$$

Trong đó: M_{f1} là ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ S_1 sang hệ tọa độ S_g; M_{2f} là ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ S_2 sang hệ tọa độ S_h.

$$M_{2f} = \begin{bmatrix} c\cos\phi & \sin\phi & -2r_p\cos\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi & 2r_p\sin\phi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Và}$$

$$M_{f1} = \begin{bmatrix} c\cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow M_{21} = M_{2f}.M_{f1} = \begin{bmatrix} c\cos 2\phi & \sin 2\phi & -2r_p\cos\phi \\ -\sin 2\phi & \cos 2\phi & 2r_p\sin\phi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tọa độ điểm M trên cung tròn CD xác định theo phương trình:

$$\mathbf{r}_{1,CD} = \mathbf{M}_{21}\mathbf{r}_{1,AB} = \begin{bmatrix} \rho\cos(\theta-2\phi) + a\cos 2\phi - 2r_p\cos\phi \\ \rho\sin(\theta-2\phi) - a\sin 2\phi + 2r_p\cos\phi \\ 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} (R-r_p)\cos\theta + r \\ (R-r_p)\sin\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Véc tơ pháp tuyến của cung tròn CD trên rotor 2 được xác định như phương trình (10):

$$\mathbf{n}_{2,CD} = \mathbf{M}_{21}\mathbf{n}_{1,AB} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi & -2r_p\cos\phi \\ -\sin 2\phi & \cos 2\phi & 2r_p\sin\phi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \left(\frac{\partial \mathbf{r}_{1,AB}(\theta)}{\partial \theta} \times \mathbf{k}\right)^T \quad (10)$$

Để cung tròn đáy và cung tròn đỉnh của hai rotor đối tiếp thỏa mãn điều kiện ăn khớp với nhau, nó được xác định qua phương trình (11):

$$f_4 = \frac{\partial \mathbf{r}_{2,CD}}{\partial \varphi}\mathbf{n}_{2,CD} = \sin(\varphi - \theta) + \sin\theta = 0 \quad (11)$$

Đoạn CD và BC nối tiếp với nhau tại điểm C, nên tại C hai đường cong phải thỏa điều kiện tiếp xúc và trơn biên dạng tương tự điểm B. Các điều kiện được thể hiện như phương trình:

(1) Điều kiện liên tục về vị trí tại điểm C thể hiện qua phương trình (12):

$$f_{1,C} = \left(x^2_{CD} + y^2_{CD}\right) - \left(x^2_{BC} + y^2_{BC}\right) = 0 \quad (12)$$

(2) Điều kiện liên tục về tiếp tuyến thể hiện qua phương trình (13):

$$f_{2,C} = \mathbf{n}_{1,CD}.t_{1,BC} = \left[\frac{\partial x_{1,BC}}{\partial u}, \frac{\partial y_{1,BC}}{\partial u}\right]^T . \left(\frac{\partial \mathbf{r}_{1,CD}(\theta)}{\partial \theta} \times \mathbf{k}\right)^T = 0 \quad (13)$$

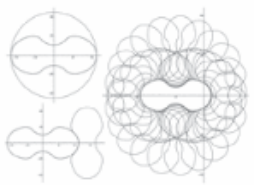
(3) Điều kiện liên tục về độ cong của hai cung cong tại điểm B:

$$f_{3,C} = \frac{\partial \mathbf{r}^2_{1,CD}(\theta)}{\partial \theta^2} - \frac{\partial \mathbf{r}^2_{1,BC}(u)}{\partial u^2} = 0 \quad (14)$$

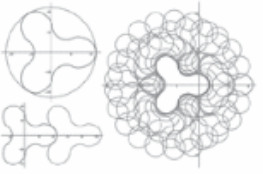
Các phương trình (1), (3) và (10) thể hiện phương trình biên dạng CIC mới. Bằng việc giải các phương trình điều kiện ở phương

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

trình (5, 6, 7, 11, 12, 13, 14) cho chúng ta giá trị các tham số thiết kế. Bằng sự hỗ trợ của công cụ Matlab và Autocad thì biên dạng rotor CIC kiểu 2, 3, 4 cánh được hình thành như hình 3.



(a) Rotor kiểu 2 cánh



(b) Rotor kiểu 3 cánh



(c) Rotor kiểu 4 cánh

Hình 3. Rotor CIC bơm Roots

3. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, Mô hình rotor CIC bơm roots được hình thành dựa trên ba đường cong cung tròn, thân khai và cung tròn. Dựa trên các phép biến đổi toán học, các phương trình toán học các cung cong tròn, cung thân khai được thiết lập. Cùng với nó là điều kiện ăn khớp đối tiếp, điều kiện liên tục được thành lập để tạo hình biên dạng rotor. Biên dạng rotor CIC với ba kiểu cánh khác nhau 2, 3, 4 cánh được tạo ra từ các mô hình toán đã minh chứng được tính đúng của mô hình toán. Từ mô hình toán này, nghiên cứu mở ra các hướng nghiên cứu tiếp theo để hoàn thiện quá trình thiết kế, chế tạo loại rotor CIC mới cho bơm Roots này.❖

Ngày nhận bài: **03/5/2025**
Ngày phản biện: **20/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Y.H. Kang, H.H. Vu, C.H. Hsu, "*Factors impacting on performance of lobe pumps: a numerical evaluation*". Journal of Mechanics 28 (2012), 229-238.

[2]. P.Y. Wang, Z.H. Fong, H.S. Fang, "*Design constraints of five-arc Roots vacuum pumps*". Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci 216 (2002), 225-234.

[3]. Y. Niimura, R. Kikuta, K. Usui, "*Two-Shaft type rotary machine having a tip circle diameter to shaft diameter within a certain range*" (1990).

[4]. C.F. Hsieh, Y.W. Hwang, "*Study on the high-sealing of roots rotor with variable trochoid ratio*". Journal of Mechanical Design 129 (2007), 1278-1284. https://doi.org/10.1115/1.2779897.

[5]. Y.W. Hwang, C.F. Hsieh, "*Study on high volumetric efficiency of the Roots rotor profile with variable trochoid ratio"*. Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci 220 (2006), 1375-1384. https://doi.org/10.1243/09544062JMES176.

[6]. C.F. Hsieh, Y.W. Hwang, "*Tooth profile of a Roots rotor with a variable trochoid ratio*". Math Comput Model 48 (2008), 19-33.

[7]. C.F. Hsieh, "*A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe pumps*". Mech Mach Theory 87 (2015), 70-81. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.018.

[8]. Y.H. Kang, H.H. Vu, "*A newly developed rotor profile for lobe pumps: Generation and numerical performance assessment*". Journal of Mechanical Science and Technology 28 (2014), 915-926.

[9]. Y.R. Wu, V.T. Tran, "*Generation method for a novel Roots rotor profile to improve performance of dry multi-stage vacuum pumps*". Mech Mach Theory 128 (2018), 475-491.

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH MA-NƠ-CANH ẢO TỪ DỮ LIỆU QUÉT 3D ỨNG DỤNG TRONG THIẾT KẾ VÀ THỬ SỬA MẪU ẢO

A STUDY ON THE DEVELOPMENT OF A MANNEQUIN MODEL FROM 3D SCANNING DATA FOR APPLICATION IN PATTERN DESIGN AND VIRTUAL FITTING

Nguyễn Quốc Toản*, Bùi Thanh Hương
Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
**Email: nqtoan@uneti.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình 3D ma-nơ-canh ảo từ dữ liệu quét 3D, nhằm ứng dụng trong thiết kế mẫu trên phần mềm Clo3D. Dữ liệu quét 3D được thu thập bằng máy quét cầm tay FARO và xử lý trên phần mềm thiết kế ngược Geomagic Design X để tái tạo mô hình ma-nơ-canh ảo có độ chính xác cao. Sau khi hoàn thiện, mô hình 3D ma-nơ-canh được tích hợp vào phần mềm Clo3D dùng để thiết kế, thử sửa mẫu sản phẩm và đánh giá độ vừa vặn của quần áo trong môi trường ảo. Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc sử dụng mô hình ma-nơ-canh ảo giúp nâng cao độ chính xác trong thiết kế, rút ngắn thời gian chỉnh sửa và cải thiện hiệu quả của quá trình phát triển sản phẩm trong ngành may mặc.

Từ khóa: *Quét 3D; Mô hình ma-nơ-canh ảo; Geomagic Design X; Clo3D; Thiết kế 3D.*

ABSTRACT

This paper presents the research results on the development of a 3D mannequin model from 3D scanning data for application in garment pattern design using Clo3D software. The 3D scan data were collected using a handheld FARO scanner and processed with reverse engineering software Geomagic Design X to reconstruct a high-accuracy mannequin model. Upon completion, the 3D mannequin model was integrated into Clo3D software to support pattern design, fitting adjustments, and garment fit evaluation. The research results demonstrate that the use of a virtual mannequin model enhances design accuracy, shortens the modification time, and improves the efficiency of the product development process in the apparel industry.

Keywords: *3D scanning; Virtual mannequin model; Geomagic Design X; Clo3D; 3D design.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành công nghiệp thời trang Việt Nam hiện nay chủ yếu sử dụng ma-nơ-canh có xuất xứ từ Trung Quốc, Đài Loan và Nhật Bản, cấu trúc và hình thái của các loại ma-nơ-canh này có nhiều điểm tương đồng so với đặc điểm, hình thái kích thước cơ thể người Việt Nam. Việc nghiên cứu xây dựng mô hình 3D mô phỏng hình dạng, cấu trúc và kích thước cơ thể được nhiều nhà khoa học trong nước nghiên cứu như công trình [1], tác giả và cộng sự đã nghiên cứu thiết kế chế tạo mô hình ma-nơ-canh trẻ em từ dữ liệu quét 3D cơ thể người. Nghiên cứu [2], tác giả đã xây dựng mô hình hóa bề mặt chân váy nữ bó sát từ các ảnh quét 3D cơ thể người, kết quả nghiên cứu là tiền đề cho việc xây dựng Avata thời trang cho vóc dáng người Việt Nam. Nghiên cứu [3] đã sử dụng dữ liệu quét 3D cơ thể người chưa có quần áo và dữ liệu quét 3D cơ thể người có quần áo để xác định mối liên hệ giữa lưới bề mặt cơ thể và lưới bề mặt quần áo. Nghiên cứu [4], tác giả nghiên cứu chế tạo cơ thể ma-nơ-canh theo kích thước cơ thể nữ sinh bằng phương pháp gia công khuôn âm, nhằm nâng cao chất lượng, hiệu quả ứng dụng thiết kế mẫu may mặc phù hợp cơ thể người Việt Nam. Trong nghiên cứu [5, 6], nhóm tác giả đã tái tạo lại mô hình ma-nơ-canh từ dữ liệu quét 3D bằng cách sử dụng các bề mặt B-spline. Đồng thời, các bề mặt B-spline được kết nối và điều chỉnh bằng phương pháp véc-tơ tiếp tuyến để cải thiện chất lượng hình dạng các bề mặt mô hình.

Với mục đích góp phần số hóa mô hình ma-nơ-canh để làm cơ sở dữ liệu sử dụng cho các phần mềm thiết kế 3D chuyên ngành như Clo3D, V-Stitcher, Optitex 3D..., giúp cho các nhà sản xuất, các trường đào tạo ngành công nghệ dệt, may tiết kiệm chi phí mua tất cả các loại ma-nơ-canh thật, thay vào đó sử dụng ma-nơ-canh ảo có đầy đủ các cỡ, vóc và kiểu dáng để phục vụ thiết kế và thử sửa mẫu. Mô hình ma-nơ canh ảo cho phép tạo mẫu nhanh hơn trên các phần mềm chuyên ngành so với phương pháp draping truyền thống, từ đó giảm thiểu được chi phí sản xuất, giúp cho người học tiếp cận và làm chủ các công cụ và phần mềm hiện đại.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Quy trình xây dựng mô hình ma-nơ-canh từ dữ liệu quét 3D



Hình 1. Quy trình thiết kế ma-nơ-canh từ dữ liệu quét 3D

2.1.1. Thu thập dữ liệu quét 3D

Đối tượng quét: Ma-nơ-canh nữ hãng Daiming (Trung Quốc) cỡ S, chủng loại ma-nơ-canh đang được sử dụng tại phòng thực hành may nhà trường và các doanh nghiệp may mặc hiện nay.

Thiết bị: Sử dụng máy quét 3D của hãng FARO Nhật Bản, đây là máy Scan 3D cầm tay nhỏ gọn, linh hoạt, có độ chính xác cao, thích hợp để số hóa các vật thể có bề mặt cong phức tạp.

☞



Hình 2. Máy quét cầm tay Faro



Hình 3. Scan 3D mô hình ma-nơ-canh

Quy trình quét:

- Chuẩn bị bề mặt ma-nơ-canh, dán tem định vị tọa độ quét;

- Tiến hành quét toàn bộ bề mặt, đảm bảo không bỏ sót chi tiết nào;

- Dữ liệu thu được dưới dạng lưới tam giác có định dạng (.stl, .obj).

2.1.2. Phân tích và xử lý dữ liệu, tái tạo mô hình 3D

Bước 1 - Nhập và làm sạch dữ liệu scan:

Trong nghiên cứu này, phần mềm Geomagic Design X được chọn để phân tích là thiết kế lại mẫu, thực hiện các công việc như: nhập dữ liệu từ máy scan có định dạng (.stl, .obj); loại bỏ dữ liệu nhiễu và các điểm lỗi; căn chỉnh dữ liệu scan để đảm bảo độ chính xác.

Bước 2 - Xử lý đám mây điểm và tạo lưới:

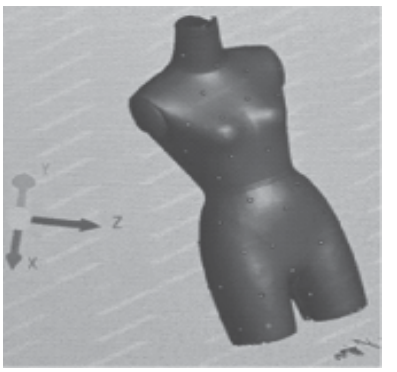
Trong quá trình quét sẽ xảy ra sai số quét do thiết bị và nhiễu. Do đó, trước khi xây dựng mô hình dữ liệu đám mây điểm cần được điều chỉnh và sửa lưới để lọc và loại bỏ các điểm nhiễu và tạo ra các bề mặt tự do. Ưu tiên lưới tam giác và tối ưu số lượng để giảm dung lượng phù hợp cấu hình máy tính.

Bước 3 - Chuyển đổi thành mô hình CAD 3D ma-nơ canh:

Từ dữ liệu đã được hiệu chỉnh của đám mây điểm sau khi quét, mô hình CAD 3D ma-nơ-canh được xây dựng bằng cách sử dụng các công cụ trên phần mềm Geomagic Design X như: Tái tạo bề mặt bám sát dữ liệu lưới; mô hình Surface; mô hình Solid như trong hình 5.

Bước 4 - Kiểm tra và hiệu chỉnh mô hình:

Mô hình CAD 3D được so sánh với dữ liệu đám mây điểm, điều chỉnh sai lệch, làm trơn biên dạng, xuất file CAD sang định dạng phổ biến (Step, Iges, Parasolid,...). Kết quả sai số giữa hai mô hình, đánh giá độ chính xác mô hình.



Hình 4. Dữ liệu quét 3D ma-nơ-canh

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



Hình 5. Mô hình CAD 3D ma-nơ-canh

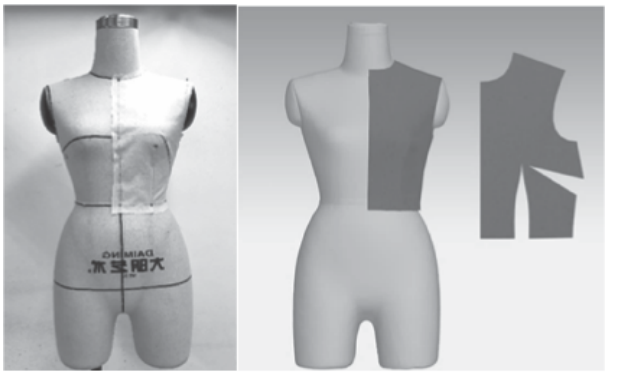
2.2. Thử sửa mẫu sản phẩm áo váy trên mô hình ma-nơ-canh ảo trong phần mềm Clo3D

Mô hình ma-nơ-canh được tái tạo từ dữ liệu quét 3D có định dạng (.obj), tiến hành nhập mô hình ma-nơ-canh ảo vào phần mềm Clo3D theo trình tự các bước trong hình 6.



Hình 6. Sơ đồ quá trình thiết kế và thử sửa mẫu trên phần mềm Clo3D

• Thiết kế mẫu: Trong nghiên cứu này, mẫu sản phẩm áo váy được lựa chọn để thiết kế và thử sửa. Mẫu thiết kế được Phủ vải trực tiếp trên mô hình ma-nơ-canh thật và ảo [7], sau đó các chi tiết mẫu được trải phẳng, hiệu chỉnh theo đúng hình dạng các chi tiết cấu thành sản phẩm của bản vẽ phác thảo hoặc mẫu hiện vật như trong hình 7. Căn cứ vào các yêu cầu kỹ thuật, mỹ thuật của sản phẩm để xác định lượng dư công nghệ, dư cử động, cộng các lượng dư này vào mẫu thiết kế trước khi may mẫu và hiệu chỉnh mẫu.



(a) *(b)*

Hình 7. Phủ vải trực tiếp trên mô hình ma-nơ-canh thật và ảo:
(a) Phủ vải trên mô hình ma-nơ-canh thật;
(b) Phủ vải trên mô hình ma-nơ-canh ảo

• May mẫu: Sử dụng các công cụ của phần mềm Clo3D, may ráp nối các chi tiết mẫu thiết kế, gán các tính chất của mẫu vải sử dụng may sản phẩm, các thông số kỹ thuật của vải có thể tham khảo trong ngân hàng dữ liệu phần mềm hoặc được xác định tại các phòng thí nghiệm vật liệu dệt may. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng mẫu vải dệt thoi có các thông số kỹ thuật được xác định tại Phòng Thí nghiệm Vật liệu dệt may, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội [8].

• Phân tích, đánh giá mẫu thiết kế: Tiến hành đánh giá hình dạng bên ngoài và đánh giá độ vừa vặn theo các nội dung sau:

- Đánh giá độ cân bằng: Mặt trước, mặt sau, đầu vai, xương bả vai, đỉnh ngực, xương hông… không bị lệch; cân bằng theo chiều dọc, ☞

tương quan giữa độ dài của áo; cân bằng theo chiều ngang; độ rộng tương ứng của từng vòng (vòng ngực, vòng eo, vòng mông).

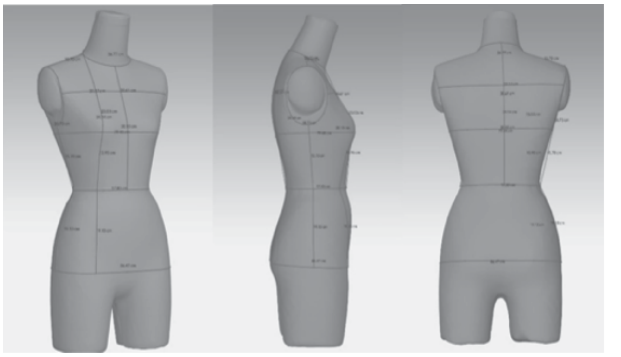
- Đánh giá mẫu thiết kế: Đường kết cấu, vị trí của mốc thiết kế với cơ thể; đánh giá theo bề mặt sản phẩm: không xuất hiện các nếp vải không cần thiết so với mẫu thiết kế phẳng.

• Đánh giá mẫu may ảo trên phần mềm: Sử dụng biểu đồ ứng suất (Stress map), biểu đồ biến dạng (Strain map) và biểu đồ độ vừa vặn (Fit map) để đánh giá độ vừa vặn.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Kết quả xây dựng mô hình CAD 3D ma-nơ-canh

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã sử dụng máy quét 3D cầm tay FARO, thiết bị có độ chính xác cao đến từ hãng FARO (Nhật Bản), để tiến hành thu thập dữ liệu hình học bề mặt của mô hình ma-nơ-canh nữ cỡ S hãng Daiming (Trung Quốc). Cấu trúc và hình thái của các loại ma-nơ-canh này có nhiều điểm tương đồng so với đặc điểm, hình thái kích thước cơ thể người Việt Nam, loại ma-nơ-canh đang được sử dụng nhiều trong đào tạo và sản xuất tại cơ sở may mặc. Quá trình quét được thực hiện trong điều kiện ánh sáng phù hợp, đảm bảo dữ liệu đám mây điểm thu được có độ phủ đều và rõ ràng, ghi lại đầy đủ các đặc điểm hình dạng, đường cong và tỷ lệ mô hình của ma-nơ-canh. Dữ liệu quét được xuất dưới định dạng (.stl và .obj).



Hình 8. Mô hình 3D ma-nơ-canh được tích hợp trong phần mềm Clo3D

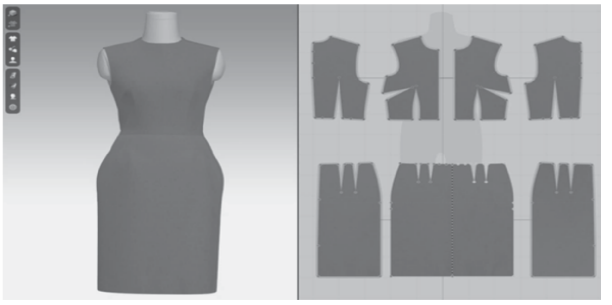
Sử dụng các công cụ của phần mềm Geomagic Design X để tiến hành xử lý bề mặt lưới theo các bước: chuyển đổi dữ liệu điểm ảnh sang dữ liệu lưới; mịn hóa bề mặt lưới và tái tạo lại một số điểm do dữ liệu quét bị lỗi. Kết quả được trình bày trong hình 5, mô hình được tái tạo từ dữ liệu quét có độ sai số thấp, hình dạng và kích thước tương đồng với ma-nơ-canh thật. Mô hình được tích hợp thành công vào Clo3D, các thao tác thiết kế mẫu trên mô hình như tạo lưới trang phục, mẫu bóc tách từ lưới bề mặt cho kết quả đáng tin cậy.

Dữ liệu quét 3D từ máy quét cầm tay FARO cho phép thu thập đầy đủ các thông số kích thước hình thể của ma-nơ-canh, bao gồm chiều cao, vòng cổ, vòng ngực, vòng eo, vòng mông, rộng vai, chiều cao ngực... So với thông số đo trực tiếp trên ma-nơ-canh thật, mô hình 3D cho thấy sai số ở mức thấp. Sai số dao động từ 0,1 đến 0,3 cm, nằm trong giới hạn cho phép để sử dụng trong thiết kế rập và mô phỏng ảo. Những sai số nhỏ này có thể xuất phát từ quá trình xử lý lưới (meshing), xử lý dữ liệu làm trơn bề mặt có thể ảnh hưởng nhẹ đến số đo. Từ kết quả phân tích trên cho thấy mô hình xây dựng từ dữ liệu quét 3D có thể được sử dụng trực tiếp trong phần mềm mô phỏng 3D như Clo3D, V-Stitcher, Optitex 3D, Marvelous Designer…

3.2. Kết quả sử dụng mô hình ma-nơ-canh trong thiết kế và thử sửa mẫu áo váy nữ

Sau khi xây dựng thành công mô hình ma-nơ-canh ảo 3D từ dữ liệu quét, mô hình đã được tích hợp vào phần mềm Clo3D để thiết kế và thử sửa mẫu trang phục. Hình 9 minh họa quá trình thiết kế một mẫu váy ôm sát cơ thể, dựa theo số đo của mô hình ma-nơ-canh cỡ S của hãng Daiming (Trung Quốc) có các số đo cơ bản như vòng ngực = 84 cm, vòng eo = 60 cm và vòng mông = 86 cm. Hình 9 bên phải là mẫu thiết kế bao gồm thân trước, thân sau, đáp cổ và phần thân trước, thân sau chân váy. Hình 9 bên trái là hình ảnh sản phẩm may mẫu trên mô hình ma-nơ-canh ảo, thể hiện rõ độ vừa vặn của trang phục với mô hình ma-nơ-canh. Các chi tiết cắt may như chiết ngực, chiết eo, ngang thân váy được thể hiện rõ nét và chính xác.

Việc sử dụng ma-nơ-canh ảo giúp người thiết kế kiểm tra ngay lập tức các lỗi như: độ căng vải, nếp nhăn, sai lệch chi tiết, từ đó rút ngắn thời gian chỉnh sửa so với phương pháp draping thủ công trên ma-nơ-canh thật. Điều này chứng minh tính hiệu quả của mô hình ma-nơ-canh ảo trong hỗ trợ thiết kế mẫu và thử sửa trang phục nữ trong môi trường ảo.



Hình 9. Mẫu thiết kế và may mẫu ảo trên phần mềm Clo3D

3.3. So sánh với thiết kế trên ma-nơ-canh thật

Độ cân bằng: Mẫu áo thể hiện sự cân đối giữa mặt trước và mặt sau trong cả mô phỏng 3D và trên mẫu thực tế. Đường viền thân áo không bị lệch, đảm bảo sự cân đối. Đường vai và vị trí đỉnh ngực được định vị chính xác. Trong ảnh may mẫu thật hình 10 và may mẫu ảo hình 11, áo ôm sát phần vai và ngực, không bị lệch; Độ dài thân áo phù hợp với dáng áo, không bị xoắn hoặc kéo lệch ở phần eo, cho thấy cân bằng tốt theo chiều dọc. Chiều ngang áo vừa vặn, không gây tình trạng phồng hoặc chật bất thường.

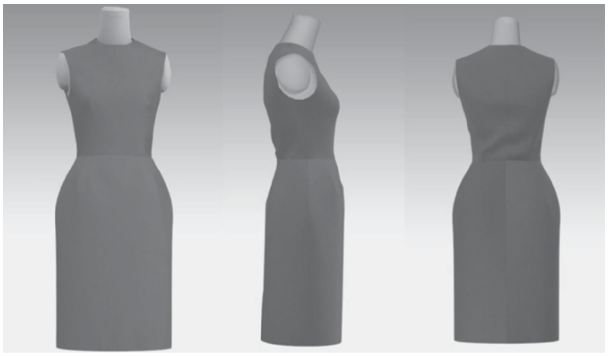
Thiết kế chi tiết: Các đường kết cấu chính như đường vai, nách, sườn thân, cổ tròn đều rõ ràng, chuẩn xác so với thiết kế gốc. Không xuất hiện các nếp nhăn trong hình mô phỏng 11, ngoại trừ một vài điểm nhăn nhẹ phía sau lưng áo cả trên mẫu thật, điều này có thể do quá trình may thử nhưng không ảnh hưởng đến phom dáng tổng thể của mẫu áo váy.

Đánh giá độ vừa vặn: Kiểm tra bằng trực quan cho thấy phần ngực, vai, nách đều vừa vặn, không xuất hiện tình trạng xô lệch hay căng kéo. Không xuất hiện nếp nhăn lớn ở vùng vai hoặc thân áo.

Mẫu áo được mô phỏng chính xác trên phần mềm Clo3D và cho kết quả thực tế rất gần với mô phỏng thể hiện trong hình 10 và hình 11. Thiết kế đảm bảo được độ cân bằng hình dạng, sự phù hợp về kích thước và độ vừa vặn khi thử nghiệm thực tế, cho thấy tiềm năng ứng dụng cao của mô hình ma-nơ-canh ảo trong thiết kế và thử sửa mẫu ảo 3D.



Hình 10. May mẫu và thử mẫu trên ma-nơ-canh thật ☞



Hình 11. May mẫu và thử mẫu trên ma-nơ-canh ảo

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy, mô hình 3D ma-nơ-canh ảo được xây dựng từ dữ liệu quét 3D sử dụng hiệu quả trong thiết kế mẫu và thử sửa ảo trên phần mềm Clo3D. So sánh kết quả thiết kế trên mô hình ảo và thử nghiệm thực tế trên ma-nơ-canh thật cho thấy độ sai lệch nhỏ không đáng kể.

Ứng dụng phương pháp này để số hóa các mô hình ma-nơ-canh các cỡ, theo từng dáng vóc, chủng loại khác nhau; tạo ra ngân hàng dữ liệu ma-nơ-canh ảo hỗ trợ trong thiết kế nhanh chóng và chính xác, rút ngắn thời gian chỉnh sửa mẫu thiết kế và tiết giảm chi phí liên quan đến việc sử dụng ma-nơ-canh thật.

Nghiên cứu này góp phần thúc đẩy quá trình số hóa trong ngành may mặc và nâng cao hiệu quả của quá trình phát triển sản phẩm ngành may, có khả năng ứng dụng rộng rãi trong sản xuất may công nghiệp, hỗ trợ quá trình đào tạo sinh viên ngành Công nghệ may và thiết kế thời trang, làm cơ sở để phát triển thư viện ma-nơ-canh ảo theo vóc dáng người Việt Nam.❖

Ngày nhận bài: **02/4/2025**
Ngày phản biện: **19/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Phan Thanh Thảo, Phan Duy Nam, Nguyễn Quốc Toản Toản (2012), "*Xây dựng mô hình 3 chiều mô phỏng hình dạng, cấu trúc và kích thước cơ thể học sinh nam tiểu học*". Tạp chí Khoa học & Công nghệ số 90 các trường Đại học Kỹ thuật.

[2]. Phan Thanh Thảo, Đinh Mai Hương (2014), "*Thiết kế 3D và 2D sản phẩm áo váy thời trang đối tượng học sinh nữ tiểu học từ dữ liệu quét 3D cơ thể người sử dụng trong sản xuất may công nghiệp Việt Nam*, Tạp chí Khoa học & Công nghệ số 98 các trường Đại học Kỹ thuật.

[3]. Nguyễn Thanh Tùng, Trần Thị Minh Kiều (2016), "*Xây dựng công thức các đường cong ngang lưới cơ sở chân váy nữ sinh Việt Nam sử dụng công nghệ 3D*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam (Hội nghị khoa học lần thứ 21).

[4]. Nguyễn Văn Du (2021), "*Nghiên cứu chế tạo ma nơ canh theo kích thước cơ thể nữ sinh Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, ứng dụng thiết kế mẫu trong may mặc*". Tạp chí Khoa học Công nghệ số 57, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.

[5]. Shih-Wen Hsiao, Rong-Qi Chen (2013), "*A study of surface reconstruction for 3D mannequins based on feature curves*". Computer-Aided Design (45), pp 1426-1441.

[6]. Charlie C. L. Wang (2010), "*CAD Tools in Fashion/Garment Design; Computer - Aided Design and Applications*". CAD 04 Conference, Pattaya Beach, Thailand; No1, pp. 53-62.

[7]. Jituo Li, Juntao Ye, Yangsheng Wang, Li Bai, Guodong Lu (2010), "*Fitting 3D garment models onto individual human models*". Elsevier Ltd, 34, pp.742-755.

[8]. Bùi Thanh Hương, Đào Thị Tình (2024), "*Nghiên cứu hoàn thiện công thức thiết kế mẫu cơ sở áo nhẹ cho nữ thanh niên lứa tuổi 18 đến 24 bằng phần mềm Clo3D*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 316.

ẢNH HƯỞNG TỐC ĐỘ VÒNG QUAY ĐỘNG CƠ DIESEL HINO XZU650 ĐẾN NỒNG ĐỘ PHÁT THẢI KHÍ XẢ

INFLUENCE OF HINO XZU650 DIESEL ENGINE ROTATION SPEED ON EXHAUST GAS EMISSIONS CONCENTRATION

Tăng Bá Đại, Nguyễn Thị An Khang, Ngô Phi Hùng, Lê Thế Quốc Hưng
Trường Đại học Công nghiệp Việt – Hung

TÓM TẮT

Bài báo tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ vòng quay (RPM) động cơ Diesel HiNo đến nồng độ phát thải các chất ô nhiễm trong khí thải như CO_2, NOx và PM (hạt bụi). Nghiên cứu được thực hiện thông qua việc mô phỏng và phân tích nồng độ khí thải ở các dải tốc độ vòng quay khác nhau. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, ở tốc 700(v/p), nồng độ NOx và PM tăng cao do quá trình cháy không hoàn toàn, ở tốc độ 2600(v/p), nồng độ NOx và PM có xu hướng giảm mạnh. Hàm lượng khí CO_2 có xu hướng giảm khi vòng quay của động cơ ở mức 1400 đến 2000 (v/p). Trên cơ sở kết quả đạt được, nghiên cứu đã đề xuất dải tốc độ vòng quay phù hợp qua đó giúp tối ưu hóa hiệu suất hoạt động của động cơ, đồng thời giảm thiểu khí thải độc hại, góp phần bảo vệ môi trường.

Từ khóa: *Động cơ diesel; Vòng quay của động cơ; Khí thải.*

ABSTRACT

The paper focuses on studying the effect of rotational speed (RPM) of HiNo Diesel engine on emission concentrations of pollutants in exhaust gas such as CO_2, NOx and PM (particulate matter). The study was conducted through simulation and analysis of exhaust gas concentrations at different rotational speed ranges. Research results show that, at 700 (rpm), NOx and PM concentrations increase due to incomplete combustion, at 2600 (rpm), NOx and PM concentrations tend to decrease sharply. CO_2 content tends to decrease when the engine speed is between 1400 and 2000 (r/p). Based on the results achieved, the study proposed a suitable rotation speed range to help optimize engine performance, while minimizing toxic emissions, contributing to environmental protection.

Keywords: *Diesel engine; Engine rotation; Exhaust emissions.*

1. GIỚI THIỆU

Ô nhiễm không khí đang trở thành mối đe dọa nghiêm trọng đối với môi trường sống, gây ra những hậu quả nặng nề cho sức khỏe cộng đồng và nền kinh tế, chi phí để nghiên cứu các biện pháp kiểm soát ô nhiễm có thể sử dụng khoảng 2,1 – 3,7% GDP vào năm 2030. Tuy nhiên, với những chi phí do ô nhiễm gây hại ra còn lớn hơn rất nhiều, điều này khẳng định rằng đầu tư vào việc cải thiện chất lượng không khí là một giải pháp tiết kiệm và bền vững hơn.

Sự phát triển của ngành công nghiệp vận hành tải với nhu cầu sử dụng động cơ Diesel ngày càng tăng đã đặt ra những vấn đề về ô nhiễm môi trường. Động cơ diesel, dù nổi bật với hiệu suất cao và khả năng tiết kiệm nhiên liệu, nhưng lại là nguồn phát thải đáng kể các chất gây ô nhiễm như CO_2, NOx và PM.

Quá trình cháy trong cơ đốt là quá trình oxy hóa nhiên liệu [1-4], giải phóng năng lượng cần thiết để động cơ hoạt động, chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như nhiệt độ, áp suất, tỷ lệ hòa trộn nhiên liệu và không khí,… cùng các điều kiện vận hành khác. Trong quá trình cháy, các chất hợp chất trung gian phức tạp được hình thành, bao gồm các hợp chất và sản phẩm cháy, sự hình thành trong nồng độ phát thải khí xả, bao gồm các chất: NOx (Ôxít Nitơ) là sản phẩm chính của phản ứng oxy hóa Nitơ trong không khí, gây ra ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng đến sức khỏe con người. CO (Carbon Monoxide): Là sản phẩm của sự cháy không hoàn toàn, có thể gây độc hại cho sức khỏe khi nồng độ cao. CO_2 (Carbon Dioxide): Là một sản phẩm cháy hoàn toàn, tuy không độc hại trực tiếp nhưng lại là khí gây hiệu ứng nhà kính, góp phần vào biến đổi khí hậu. HC (Hydrocacbon chưa cháy hết): Là các hợp chất chưa được oxy hóa hoàn toàn trong quá trình cháy, gây ô nhiễm không khí và tạo ra mùi khó chịu. PM (Particulate Matter): Là các hạt bụi hình thành trong quá cháy, gây hại cho sức khỏe hô hấp và môi trường.

Các sản phẩm cháy này không ảnh hưởng chỉ đến chất lượng không khí mà còn tác động trực tiếp đến hiệu suất của động cơ, do đó công việc nghiên cứu tốc độ vòng quay của động (RPM) cơ là rất quan trọng trong việc giảm thiểu ô nhiễm môi trường trường.

Động cơ Diesel HINO XZU650 là một mẫu xe tải hạng nhẹ theo tiêu chuẩn Enro 4. Thông số kỹ thuật được mô tả như (Bảng 1).

Bảng 1. Thông số động cơ Diesel HINO (HINO XZU650 - động cơ N04C-UV Euro 4)

Thông số	Giá trị
Mã động cơ	N04C-UV Euro 4
Số xy lanh	4
Đường kính xy lanh (mm)	104
Hành trình piston (mm)	118
Thể tích công tác (cm^3)/Thể tích xi lanh	4009
Tỷ số nén	18:1
Công suất định mức (kW)/vòng quay (vg/ph)	100/2600
Công suất cực đại (KW/rpm)	136/150 PS
Mô men cực đại (N.m)/vòng quay (vg/ph)	400/1600 390/420 N.m

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Trong bối cảnh ngày càng có nhiều quy định khắt khe về phát thải, việc nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến nồng độ khí thải, đặc biệt là tốc độ quay của động cơ cơ (RPM), trở thành vấn đề quan trọng. Cơ chế quay tốc độ không ảnh hưởng chỉ đến hiệu suất hoạt động mà còn quyết định mức độ phát thải của các chất ô nhiễm [5].

2. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Nghiên cứu tập trung đánh giá ảnh hưởng của tốc độ vòng quay động cơ Diesel HiNo (RPM) đến phát thải các chất ô nhiễm trong khí xả, bao gồm NOx, CO_2 và PM, thông qua mô phỏng bằng phần mềm Diesel RK. Các kết quả chính của mô phỏng cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa nhiên liệu với tốc độ vòng quay của động cơ cũng như mức độ phát thải khí xả, cụ thể (bảng 2):

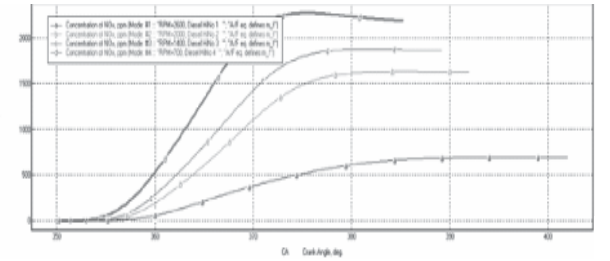
Bảng 2. Mối quan hệ giữa tốc độ vòng quay và mức độ tiêu thụ nhiên liệu với lượng phát thải khí xả

TT	Tốc độ vòng quay (RPM)	Mức tiêu thụ nhiên liệu (kg/kWh)	Phát thải dạng hạt PM (g/kWh)	Phát thải khí carbon dioxide (g/kWh)	Phát thải khí NOx (g/kWh)
1	700.00	0.25316	0.19848	815.75	2028.3
2	1400.0	0.21568	0.11439	694.98	1742.0
3	2000.0	0.21144	0.09094	681.30	1524.3
4	2600.0	0.21796	0.04437	702.32	656.90

• Khi động cơ hoạt động ở tốc độ quay thấp (700 vòng/phút): Mức tiêu thụ nhiên liệu ở giai đoạn này tương đối cao. Do vòng quay thấp, quá trình cháy diễn ra trong buồng đốt không hoàn toàn, dẫn đến sự gia tăng nồng độ của HC và hàm lượng CO_2. Điều này là do hydrocacbon chưa cháy hết, tạo ra các hợp chất khí không mong muốn. Ở giai đoạn này, phát thải dạng hạt (PM) và phát thải dạng khí tăng lên đáng kể, tạo điều kiện thuận lợi cho phản ứng oxy hóa nitơ (NOx), vì NOx không chỉ gây ô nhiễm không khí mà còn là nguyên nhân chính gây mưa axit và các bệnh về đường hô hấp.

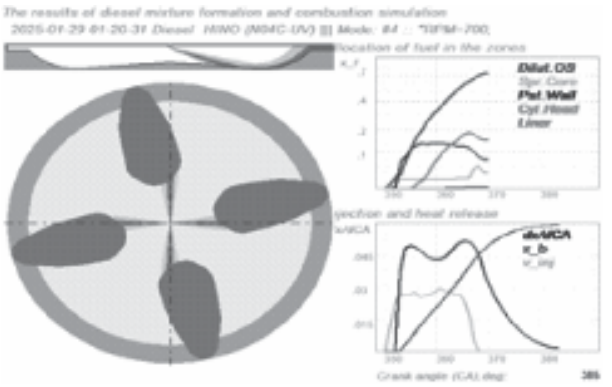
• Tốc độ quay trung bình 1400 đến 2000(v/p): Tốc độ vòng quay tăng đồng nghĩa với việc nhiên liệu được đốt cháy triệt để, hàm lượng CO_2 giảm do quá trình chuyển hóa năng lượng tốt hơn. Đồng thời, sự hình thành của NOx và PM cũng giảm do điều kiện cháy tốt, hạn chế khả năng phát sinh các hợp chất không mong muốn trong quá trình cháy. Nhìn chung, ở dải tốc độ này, động cơ đạt được sự cân bằng tốt giữa hiệu suất và nhiên liệu.

• Tốc độ quay cao 2600 (v/p): Khi tốc độ vòng quay cao, nồng độ NOx và PM giảm mạnh, hàm lượng phát thải khí carbon dioxide có xu hướng tăng nhẹ. Đây là dải tốc độ lý tưởng, nơi động cơ hoạt động hiệu quả nhất với mức phát thải ô nhiễm thấp nhất.



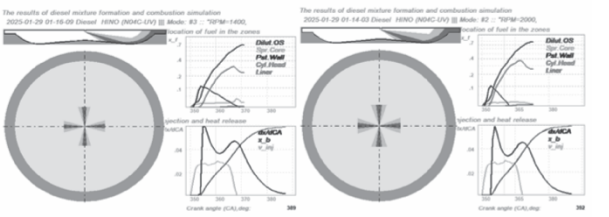
Hình 1. Mối quan hệ giữa hàm lượng NOx với dải tốc độ vòng quay động cơ

NOx tăng theo góc quay trục khuỷu từ 355 tại 374 độ (vòng quay trục khuỷu), khi vòng quay thay đổi, giá trị NOx cũng thay đổi theo (Hình 1). Điều này phản ánh mối quan hệ giữa tốc độ cơ và sự hình thành khí thải NOx. Ngoài ra, khi động cơ chạy ở vòng quay thấp, sự đốt cháy không hoàn toàn có thể tạo ra NOx không phải ở mức độ thấp nhất mà còn có thể tạo ra yếu tố như: Thời gian cháy lâu hơn, thậm chí cháy không hết,… nồng độ NOx cao nhất (gần 2000 ppm), đạt đỉnh sớm hơn so với các đường khác, điều này cho thấy tốc độ phun nhiên liệu cao (7%) tạo ra nhiệt độ cháy cao hơn. Khi tốc độ động cơ tốc độ (700 RPM) và lượng nhiên liệu nhỏ (3%) làm giảm quá trình và nhiệt độ cháy, nồng độ NOx ở mức trung bình (khoảng 1000-1500 ppm).



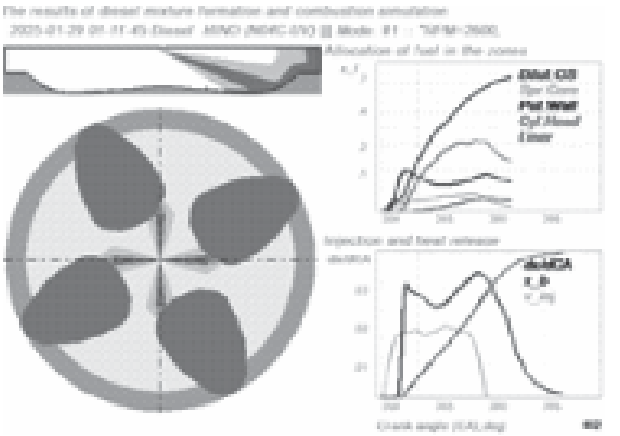
Hình 2. Biểu đồ mô phỏng quá trình hình thành hỗn hợp diesel với tốc độ vòng quay động cơ 700 (v/p)

Vùng RPM thấp (Hình 2) thường có thời gian cháy dài hơn, tạo điều kiện cho hỗn hợp nhiên liệu – không khí cháy gần hoàn toàn. Hiệu quả cháy có thể thấp hơn vùng tối ưu, dẫn đến tăng phát thải các khí như PM hoặc HC (hydrocarbon không cháy hết). Nhiệt độ cháy thấp hơn làm khả năng cháy không hoàn toàn sẽ tăng CO và HC. Nếu nhiên liệu không hòa trộn đều với không khí, khả năng cháy không hoàn toàn sẽ cao dẫn đến PM và HC tăng. Nhiệt độ thấp hơn tại tốc độ 700 RPM sẽ giữ lượng NOx thấp. Phát thải PM và HC có thể tăng nếu nhiên liệu cháy không hết. Lượng CO sẽ tăng ở các khu vực có lượng oxy thấp.



Hình 3. Biểu đồ mô phỏng quá trình hình thành hỗn hợp diesel với tốc độ vòng quay động cơ 1400-2000 (v/p)

• Vị trí nhiên liệu trong các vùng (Hình 3): Dilut.OS (khí thải pha loãng), Spr.Core (phun sương), Pat.Wall (thành piston), và Cyl. Head có thể cho thấy sự phân bố nhiên liệu không đồng đều. Khi nhiên liệu không cháy hoàn toàn (chẳng hạn nhiên liệu dính thành buồng đốt hoặc bị làm lạnh), sẽ dẫn đến phát thải các chất như hydrocarbon chưa cháy (HC) hoặc muội than (PM). Phun nhiên liệu và giải phóng nhiệt, quá trình cháy xảy ra nhanh sẽ tạo ra nhiều khí NOx (oxit nitơ). Ngược lại, nếu nhiên liệu không cháy hoàn toàn hoặc cháy ở nhiệt độ thấp (cháy nghèo), sẽ sinh ra nhiều HC và CO (carbon monoxide).



Hình 4. Biểu đồ mô phỏng quá trình hình thành hỗn hợp diesel với tốc độ vòng quay động cơ 2600 (v/p)

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Ở giai đoạn 2600 (RPM), hỗn hợp khí cháy tốt hơn khi tốc độ động cơ cao, chứng tỏ quá trình hòa trộn được cải thiện giúp tối ưu hóa quá trình cháy. Đường phun nhiên liệu có dạng sắc nét hơn, thời gian phun ngắn hơn so với 1400-2000 (v/p), phù hợp với tốc độ vòng quay cao. Thời gian hòa trộn nhiên liệu – không khí ngắn hơn, dẫn đến quá trình cháy diễn ra nhanh hơn, điều này dẫn đến giảm khả năng phát thải PM và NOx.

Nhận xét: Nếu giá trị này cao (Dilut. OS), nghĩa là pha loãng nhiên liệu với không khí tốt, thường giúp giảm NOx nhưng có thể làm tăng HC hoặc CO. Sự phân bố nhiên liệu tập trung nhiều trong các vùng (Spr.Core) hoặc (Pat.Wall), do đó có thể gây tăng PM và HC. Nếu quá trình cháy xảy ra đột ngột với giá trị dx/dCA cao, sẽ làm tăng NOx.

3. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu, có thể đưa ra một số khuyến nghị cho việc tối ưu hóa tốc độ quay động cơ Diesel Hino như sau:

• Với tốc độ quay động cơ: Nên vận hành động cơ ở tốc độ quay cao (2600 RPM), nơi mà các chất ô nhiễm như CO và HC được kiểm soát tốt, đồng thời NOx và PM ở mức chấp nhận được. Việc duy trì tốc độ vòng quay trong dải này sẽ giúp giảm thiểu ô nhiễm và tăng hiệu quả hoạt động của động cơ.

• Cải tiến công nghệ: Để giảm phát thải NOx ở tốc độ quay thấp, cần áp dụng các công nghệ giảm thiểu NOx như hệ thống làm mát khí nạp, tái tuần hoàn khí thải (EGR), hoặc phát triển bộ lọc NOx (SCR) để giảm thiểu tác động của NOx đối với môi trường.

• Điều kiện vận hành: Cần theo dõi và điều chỉnh chế độ vận hành động cơ để duy trì mức độ tốc độ vòng quay cao. Việc này không chỉ giúp giảm ô nhiễm mà còn cải thiện tuổi thọ và hiệu quả của động cơ.❖

Ngày nhận bài: **16/4/2025**
Ngày phản biện: **05/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Minh Trí, Lưu Quang Diệu, "*Phân tích ảnh hưởng của trạng thái kỹ thuật động cơ diesel đến mức tiêu thụ nhiên liệu*". Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 64, 11/2020.

[2]. Kupper,F.etal.(2018)"*Robustfuelconsumption estimation for on-line optimization of diesel engines*". IFACPapersOnLine. Elsevier B.V., 51(31), pp. 233-239. doi: 10.1016/j. ifacol.2018.10.042.

[3]. Trần Ngọc Chấn, "*Ô nhiễm không khí và xử lý khí thải*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2002.

[4]. VladimirLozhkinaOlgaLozhkinaabViktorD obromirovc (2018), "*A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg*". Volume 36, 2018, Pages 453-458.

[5]. Hoàng Văn Sĩ, Lê Văn Đồng, "*Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ khí cháy đến độc tố khí thải NOx trên động cơ diesel GM Motori HRM494*". Kỷ yếu Hội thảo cấp trường, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2022.

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH PHANH TÁI SINH TRÊN XE VF3

SIMULATION STUDY OF THE REGENERATIVE BRAKING PROCESS ON THE VF3 VEHICLE

Lê Trạch Trưởng, Vũ Trần Hoàng, Nguyễn Văn Minh, Phí Hoàng Trình
Trường Đại học Công nghệ Đông Á

TÓM TẮT

Hệ thống phanh tái sinh là một giải pháp quan trọng giúp tận dụng động năng của xe để chuyển hóa thành điện năng, từ đó gia tăng hiệu suất sử dụng năng lượng và mở rộng phạm vi hoạt động của xe điện. Nghiên cứu này tập trung vào mô phỏng quá trình phanh tái sinh trên xe VinFast VF3 bằng MATLAB & Simulink, nhằm đánh giá hiệu suất thu hồi năng lượng và tác động đến mức độ sạc pin.

Mô hình mô phỏng được xây dựng dựa trên các phương trình động lực học của xe, trong đó xét đến các yếu tố như tốc độ xe, mô-men hãm động cơ và điều kiện vận hành thực tế. Thuật toán điều khiển phanh tái sinh được thiết kế để tối ưu quá trình chuyển đổi năng lượng, giúp cải thiện hiệu suất thu hồi năng lượng mà không ảnh hưởng đến cảm giác lái.

Kết quả mô phỏng cho thấy tỷ lệ sạc pin có thể tăng khoảng 18% khi sử dụng phanh tái sinh so với hệ thống phanh thông thường. Ngoài ra, nghiên cứu cũng thực hiện phân tích tác động của các điều kiện lái xe khác nhau, bao gồm tốc độ cao, tốc độ thấp và điều kiện dừng xe, để đánh giá khả năng thu hồi năng lượng trong từng trường hợp. Kết quả chỉ ra rằng hệ thống phanh tái sinh hoạt động hiệu quả nhất trong môi trường đô thị, nơi xe có nhiều tình huống phanh - tăng tốc liên tục.

Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc phát triển hệ thống phanh tái sinh trên xe điện, giúp tối ưu hóa hiệu suất năng lượng và góp phần giảm tiêu thụ điện năng trong quá trình vận hành.

Từ khóa: *Phanh hãm tái sinh; MATLAB; VF3; ISO 26262; SOC%.*

ABSTRACT

The regenerative braking system is a crucial solution that utilizes the vehicle's kinetic energy to convert it into electrical energy, thereby enhancing energy efficiency and extending the driving range of electric vehicles. This study focuses on simulating the regenerative braking process on the VinFast VF3 using MATLAB & Simulink to evaluate energy recovery efficiency and its impact on battery charging levels.

The simulation model is built based on the vehicle's dynamic equations, considering factors such as vehicle speed, braking torque, and real-world operating conditions. The regenerative braking control algorithm is designed to optimize the energy conversion process, improving energy recovery efficiency without compromising driving comfort.

Simulation results indicate that battery charging levels can increase by approximately 18% when using regenerative braking compared to conventional braking systems. Additionally, the study analyzes the impact of different driving conditions, including high-speed, low-speed, and stop-and-go scenarios, to assess energy recovery potential in each case. The results show that the regenerative braking system operates most efficiently in urban environments, where frequent braking and acceleration occur.

This study provides a scientific and practical foundation for developing regenerative braking systems in electric vehicles, optimizing energy efficiency, and contributing to reducing overall energy consumption during operation.

Keywords: *Regenerative braking; MATLAB; VF3; ISO 26262; SOC%.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh chóng của xe điện (EV) trong những năm gần đây đã đặt ra yêu cầu cao hơn về hiệu suất năng lượng và an toàn vận hành. Một trong những công nghệ quan trọng giúp cải thiện hiệu suất của xe điện là hệ thống phanh hãm tái sinh. Hệ thống này cho phép thu hồi một phần năng lượng từ quá trình phanh và chuyển hóa thành điện năng để sạc lại pin, từ đó giúp tăng phạm vi hoạt động của xe và giảm tiêu hao năng lượng. Tuy nhiên, việc tích hợp phanh tái sinh vào hệ thống phanh tổng thể của xe điện đặt ra nhiều thách thức liên quan đến điều khiển, phân bổ lực phanh và đảm bảo an toàn vận hành.

VF3 là một mẫu xe điện đô thị mới được phát triển với mục tiêu tối ưu hiệu suất và tiết kiệm năng lượng. Trong đó, hệ thống phanh tái sinh đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng thu hồi năng lượng và nâng cao hiệu quả vận hành. Để đảm bảo hệ thống này hoạt động an toàn và đáng tin cậy, việc tuân thủ tiêu chuẩn ISO 26262 – tiêu chuẩn an toàn chức năng cho các hệ thống điện và điện tử trên ô tô – là điều cần thiết.

Áp dụng ISO 26262 vào thiết kế hệ thống phanh tái sinh trên VF3 không chỉ giúp tối ưu hóa quá trình thu hồi năng lượng mà còn đảm bảo hệ thống đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt về an toàn, giúp duy trì sự ổn định và kiểm soát của xe trong mọi điều kiện vận hành.

Trong nghiên cứu này, các tác giả tiến hành mô phỏng hệ thống phanh tái sinh trên VF3 bằng MATLAB, một công cụ mạnh mẽ trong việc phân tích và kiểm tra hiệu suất hệ thống phanh. Mô hình mô phỏng được xây dựng để kiểm tra các yếu tố quan trọng như: Hiệu suất thu hồi năng lượng khi sử dụng phanh tái sinh; Phân bổ lực phanh giữa phanh ma sát và phanh tái sinh để đảm bảo an toàn và ổn định xe; Đánh giá mức độ đáp ứng của hệ thống điều khiển theo tiêu chuẩn ISO 26262 trong các tình huống phanh khác nhau.

Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp tối ưu hóa hệ thống phanh tái sinh trên VF3 mà còn đóng góp vào việc phát triển các phương pháp kiểm soát phanh tái sinh trên xe điện nói chung. Ngoài ra, việc tuân thủ tiêu chuẩn ISO 26262 giúp tăng cường độ tin cậy và an toàn của hệ thống, tạo tiền đề cho việc ứng dụng rộng rãi hơn trong ngành công nghiệp ô tô. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng theo hướng tích hợp trí tuệ nhân tạo để điều chỉnh chế độ phanh tái sinh linh hoạt hơn, phù hợp với điều kiện vận hành thực tế của xe điện.

2. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

2.1. Tổng quan phanh tái sinh

Hệ thống phanh tái sinh là một công nghệ quan trọng trên ô tô điện, cho phép thu hồi một phần năng lượng từ quá trình phanh và chuyển hóa thành điện năng để sạc lại pin. Không giống như hệ thống phanh ma sát truyền thống, phanh tái sinh sử dụng động cơ điện ở chế độ máy phát để tạo mômen cản, giúp xe giảm tốc và đồng thời thu hồi năng lượng. Điều này không chỉ giúp cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng mà còn làm giảm hao mòn hệ thống phanh cơ khí, kéo dài tuổi thọ của các bộ phận phanh [1].

Khi người lái đạp phanh hoặc nhả chân ga, động cơ điện chuyển từ chế độ truyền động sang chế độ máy phát. Khi đó, năng lượng cơ học từ bánh xe được chuyển thành năng lượng điện thông qua máy phát điện, sau đó được lưu trữ trong pin để sử dụng sau này.

Tùy theo mức độ phanh và tình trạng pin, hệ thống có thể hoạt động ở hai chế độ. Chế độ phanh tái sinh hoàn toàn: Khi động cơ điện tạo đủ mô-men phanh để giảm tốc xe mà không cần đến phanh ma sát; Chế độ phanh kết hợp: Khi mômen phanh tái sinh không đủ, hệ thống sẽ phối hợp giữa phanh tái sinh và phanh ma sát để đảm bảo hiệu quả phanh.

Mặc dù có nhiều lợi ích, hệ thống phanh tái sinh vẫn gặp một số thách thức: Hiệu suất thu hồi năng lượng phụ thuộc vào tình trạng pin: Nếu pin đã đầy, hệ thống không thể tiếp tục sạc và buộc phải sử dụng phanh ma sát nhiều hơn; Tính ổn định và an toàn khi phanh: Việc phối hợp giữa phanh tái sinh và phanh ma sát cần được kiểm soát chính xác để tránh ảnh hưởng đến độ ổn định của xe, đặc biệt trong các tình huống khẩn cấp; Độ trễ phản hồi của hệ thống phanh tái sinh: Quá trình chuyển đổi giữa phanh tái sinh và phanh ma sát có thể gây ra độ trễ, ảnh hưởng đến cảm giác lái và hiệu suất phanh tổng thể [2].

2.2. Mô hình mô phỏng hệ thống phanh tái sinh

Hệ thống phanh tái sinh (Regenerative Braking System - RBS) có nhiệm vụ thu hồi động năng của xe khi phanh và chuyển đổi nó thành điện năng để sạc lại pin. Mô phỏng hệ thống này đòi hỏi xây dựng các phương trình mô tả động lực học xe, hệ thống truyền động và hiệu suất thu hồi năng lượng. Chuyển động của xe có thể được mô tả bởi phương trình cân bằng lực phương trình (1) [4-8]:

$$m.\frac{dv}{dt} = F_{tractive} - F_{resistive} - F_{braking} \quad (1)$$

Trong đó: m là khối lượng của xe (kg); v là vận tốc của xe (m/s); $F_{tractive}$ là lực kéo do động cơ tạo ra (N); $F_{resistive}$ tổng lực cản (bao gồm cản lăn, cản khí động, cản dốc); $F_{braking}$ là lực phanh do hệ thống phanh tác động lên xe.

Hệ thống phanh tái sinh sử dụng động cơ điện để tạo lực hãm thông qua mômen tái

tạo T_{regen}. Lực phanh tái sinh có thể tính bằng phương trình (2):

$$T_{regen} = \frac{P_{regen}}{\omega} \quad (2)$$

Với $P_{regen} = \eta_{regen}.P_{mech}$ (công suất điện thu hồi, với η_{regen} là hiệu suất thu hồi); $P_{mech} = T_{wheel}.\omega$: Công suất cơ học tại các bánh xe; ω là tốc độ góc của bánh xe (rad/s).

Tỷ lệ giữa phanh tái sinh và phanh ma sát được xác định bởi thuật toán điều khiển phương trình (3):

$$F_{braking} = F_{regen} + F_{friction} \quad (3)$$

Với $F_{friction}$ là lực phanh từ hệ thống phanh ma sát truyền thống.

Năng lượng thực tế được lưu vào pin phụ thuộc vào hiệu suất sạc của hệ thống lưu trữ (4):

$$E_{stored} = \eta_{battery}.E_{regen} \quad (4)$$

Với $\eta_{battery}$ là hiệu suất sạc của pin.

Đánh giá hiệu suất phanh tái sinh: Hiệu suất thu hồi năng lượng được tính bằng tỷ lệ giữa năng lượng thu hồi và năng lượng ban đầu phương trình (5):

$$\eta_{RBS} = \frac{E_{regen}}{E_{kinetic}} \quad (5)$$

Với $E_{kinetic} = \frac{1}{2}m.v^2$.

Hệ thống phanh tái sinh thu hồi năng lượng từ quá trình phanh và chuyển đổi nó thành điện năng để sạc lại pin. Để tính toán phần trăm sạc pin (ΔSOC), ta sử dụng các phương trình sau: Tổng năng lượng thu hồi từ phanh tái sinh, công suất điện thu hồi từ phanh tái sinh được tính bằng (6):

$$P_{regen} = \eta_{regen}.P_{mech} \quad (6)$$

Với: P_{regen} là công suất điện thu hồi (W); η_{regen} là hiệu suất của hệ thống phanh tái sinh; P_{mech} là công suất cơ học của động cơ ở chế độ phanh tái sinh.

Công suất cơ học tại bánh xe (7):

$$P_{regen} = F_{regen}.v \quad (7)$$

Tổng năng lượng thu hồi trong một chu trình phanh được tính bằng tích phân công suất theo thời gian:

$$E_{regen} = \int P_{regen} dt \quad (8)$$

Năng lượng thực tế được lưu trữ trong pin phụ thuộc vào hiệu suất sạc của pin và được tính theo công thức (9):

$$E_{stored} = \eta_{battery}.E_{regen} \quad (9)$$

Với: E_{stored} là năng lượng thực tế lưu vào pin (J hoặc Wh); $\eta_{battery}$ là hiệu suất sạc của pin (thường khoảng 90-95%).

Thay đổi phần trăm SOC của pin: Trạng thái sạc của pin (SOC) biểu thị mức năng lượng còn lại của pin so với dung lượng tối đa (10):

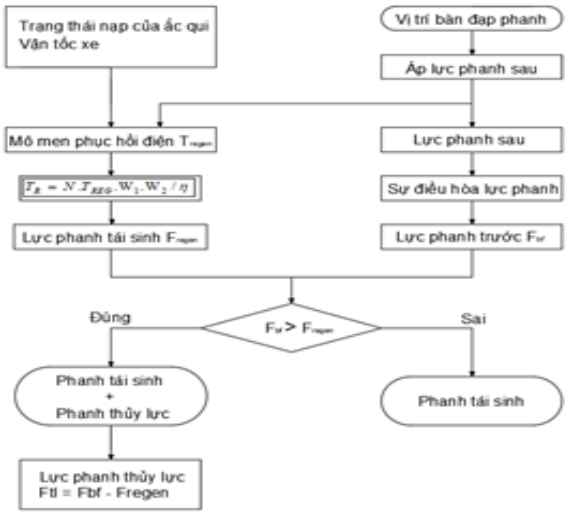
$$SOC = \frac{E_{battery}}{E_{Battery,max}}.100\% \quad (10)$$

Phần trăm sạc pin tăng thêm nhờ phanh tái sinh được tính bằng (11):

$$\Delta SOC = \frac{E_{stored}}{E_{Battery,max}}.100\% \quad (11)$$

Với: $E_{Battery,max}$ là dung lượng tối đa của pin (J hoặc Wh); ΔSOC là phần trăm sạc pin tăng thêm sau quá trình phanh tái sinh.

Sơ đồ thuật toán của quá trình phanh tái sinh được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Sơ đồ thuật toán của phanh hãm tái sinh trên ô tô điện

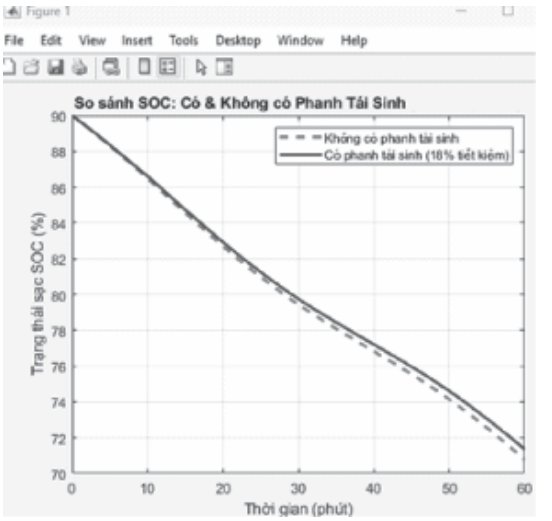
2.3. Kết quả mô phỏng và phân tích

Sử dụng mô phỏng trên MATLAB, với thông số đầu vào của mô hình thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số đầu vào của mô phỏng [3]

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng xe (m)	1100	kg
Hệ số cản lăn (Cr)	0.01 - 0.015	-
Hệ số cản khí động (Cd)	0.32	-
Diện tích cản gió (A)	2.2	m²
Hệ số tái sinh	0.6 - 0.8	-
Công suất động cơ	32	kW
Mô-men xoắn cực đại	110	Nm
Dung lượng pin	18,64	kWh
Quãng đường mô phỏng	40	km
Tốc độ trung bình	40	km/h
Hiệu suất hệ truyền động	0.85	-
Mức tiêu thụ điện năng	~9	kWh/100 km
Điện áp danh định của pin	346	V
Dung lượng pin	18,64	kWh
Công suất tiêu thụ trung bình	8,33	kWh/100 km
Dòng điện trung bình	≈ 24	A
Quãng đường mô phỏng	40	km
Tốc độ trung bình trong đô thị	40	km/h
Số lần đạp phanh trong 1 giờ	40 - 80	lần/giờ

Với thời gian mô phỏng là 1 giờ, xe đi trong đô thị với số lần phanh là 75 lần/1 giờ. Với điều kiện xe ở trạng thái ban đầu pin là 90%. Kết quả mô phỏng ta được đồ thị so sánh trạng thái sạc SOC% có và không có phanh tái sinh được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. So sánh SOC có và không có phanh tái sinh

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Trạng thái sạc của pin (SOC) phản ánh lượng năng lượng còn lại trong pin so với tổng dung lượng pin. Mức tăng 18% SOC: Nếu pin có dung lượng tối đa 18.64 kWh (xe VinFast VF3), thì năng lượng thu hồi là:

$$E_{regen} = 0.18 \times 18.64 = 3.3552 \text{ kWh}$$

Với phạm vi hoạt động ban đầu khoảng 210 km, nếu lượng điện thu hồi được sử dụng hoàn toàn, quãng đường đi thêm có thể đạt:

$$\Delta d = \frac{3.3552}{18.64} . 210 = 37.8 \text{ km}$$

Như vậy: Nhờ phanh tái sinh, xe có thể đi thêm gần 38 km, giúp kéo dài phạm vi hoạt động mà không cần sạc thêm từ lưới điện.

3. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện mô phỏng quá trình phanh tái sinh trên xe VinFast VF3 bằng MATLAB & Simulink, đánh giá hiệu quả thu hồi năng lượng và tác động đến trạng thái sạc của pin (SOC). Kết quả cho thấy hệ thống phanh tái sinh giúp tăng mức sạc pin lên 18%, tương ứng với quãng đường đi thêm khoảng 38 km mà không cần sạc từ lưới điện.

Mô hình mô phỏng đã phản ánh chính xác động lực học của xe, quá trình chuyển đổi cơ-nhiệt-điện, cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất thu hồi năng lượng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng hiệu suất phanh tái sinh phụ thuộc vào điều kiện vận hành, chu trình lái xe, và hiệu suất của hệ thống lưu trữ năng lượng.

Việc áp dụng hệ thống phanh tái sinh không chỉ giúp giảm tiêu hao năng lượng và tăng phạm vi hoạt động của xe mà còn góp phần cải thiện tuổi thọ pin. Cụ thể, phanh tái sinh giúp giảm số lần xả sâu của pin, hạn chế dòng sạc/xả cực đại, duy trì nhiệt độ hoạt động ổn định và giữ mức sạc trong khoảng tối ưu, từ đó làm chậm quá trình suy giảm dung lượng pin theo thời gian. Bên cạnh đó, phanh tái sinh còn đóng vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ phát triển phương tiện giao thông bền vững. Những kết quả này có thể làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm tối ưu hóa thuật toán điều khiển phanh tái sinh, cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng trên xe điện và kéo dài tuổi thọ hệ thống pin.❖

Ngày nhận bài: **26/3/2025**
Ngày phản biện: **08/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Pham, T. H., & Nguyen, D. V. (2022), "*Regenerative Braking System for Electric Vehicles: Modeling and Simulation Analysis*". IEEE Transactions on Vehicular Technology.
[2]. Chen, L., & Wang, Y. (2021), "*Energy Recovery Efficiency of Regenerative Braking in Evs*". Journal of Energy Storage, 45, 103-112.
[3]. VinFast Official Website (2024), "*Thông số kỹ thuật VinFast VF3". Truy cập từ: https://vinfastauto.com*
[4]. *Bosch Mobility Solutions (2020), "Regenerative Braking Systems: Principles and Applications*". Bosch Technical Reports.
[5]. SAE International] (2019), "*Hybrid and Electric Vehicle Energy Management with Regenerative Braking*". SAE Technical Paper 2019-01-1234.
[6]. Zhang, X., Li, Q., & He, Z. (2023), "*Impact of Regenerative Braking on Battery Life and Efficiency in Electric Vehicles*". Renewable Energy, 150, 345-360.
[7]. ResearchGate (2022), "*Ứng dụng MATLAB/ Simulink trong mô phỏng hệ thống phanh tái sinh trên ô tô điện*". Truy cập từ: https://www.researchgate.net
[8]. Chau, K. T., & Wong, Y. S. (2018), "*Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with MATLAB Models*". Wiley Press.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN KHẢ NĂNG GIA CÔNG VẬT LIỆU DA BẰNG PHƯƠNG PHÁP DÂY NÓNG

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE ABILITY TO PROCESS LEATHER MATERIALS BY HOT WIRE METHOD

Trần Văn Mạnh
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
Email: tvmanh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng gia công vật liệu da bằng phương pháp dây nóng. Kỹ thuật gia công nhiệt không tiếp xúc sử dụng dây kim loại gia nhiệt để cắt các vật liệu mềm như xốp hoặc da công nghiệp [1]. Nghiên cứu thực hiện trên hệ thống dây nóng điều khiển bằng Arduino, sử dụng cảm biến nhiệt để kiểm soát nhiệt độ dây cắt [2]. Các thông số được khảo sát bao gồm: dòng điện qua dây, tốc độ tiến dao và chu kỳ làm việc [3]. Kết quả thực nghiệm cho thấy dòng điện có ảnh hưởng lớn nhất đến tỷ lệ carbon hóa trên vật liệu, trong khi tốc độ tiến dao và chu kỳ làm việc ảnh hưởng đến độ mịn bề mặt và hiệu suất cắt. Bài viết đề xuất mô hình thực nghiệm và phân tích định tính, tạo nền tảng cho nghiên cứu tối ưu hóa quá trình gia công bằng dây nóng đối với vật liệu da trong tương lai.

Từ khóa: *Dây nóng; Gia công nhiệt; Vật liệu da; Carbon hóa; Cảm biến nhiệt.*

ABSTRACT

The paper presents the process of investigating the influence of technological parameters on the ability to process leather materials by hot wire method. Non-contact thermal processing technique uses heated metal wire to cut soft materials such as foam or industrial leather [1]. The study was conducted on a hot wire system controlled by Arduino, using a temperature sensor to control the cutting wire temperature [2]. The parameters investigated include: wire current, feed rate and working cycle [3]. Experimental results show that the current has the greatest influence on the carbonization rate of the material, while the feed rate and working cycle affect the surface smoothness and cutting efficiency. The paper proposes an experimental model and qualitative analysis, creating a foundation for future research on optimizing the hot wire processing process for leather materials.

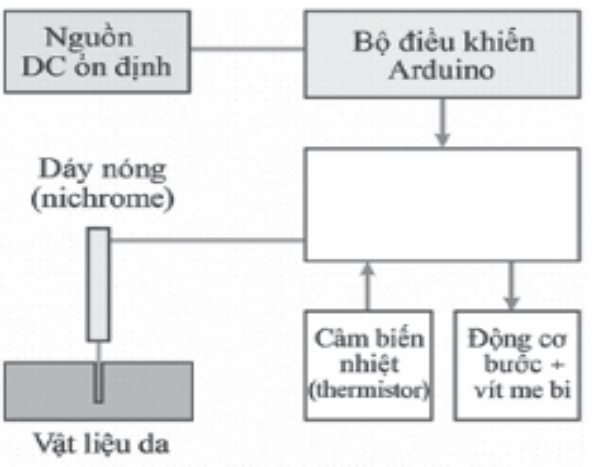
Keywords: *Hot wire; Thermal processing; Leather materials; Carbonization; Temperature sensor.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vật liệu da được sử dụng phổ biến trong các ngành công nghiệp như ô tô, hàng không, đồ nội thất với vai trò làm vỏ bọc ghế, lớp cách âm, hoặc chi tiết trang trí. Tuy nhiên, việc gia công da bằng phương pháp truyền thống (cắt tay, dập khuôn) bộc lộ nhiều nhược điểm như năng suất thấp, độ chính xác không ổn định và chi phí bảo trì cao.

Phương pháp cắt bằng dây nóng là kỹ thuật không tiếp xúc, thường dùng trong tạo hình vật liệu xốp, khả năng cắt theo biên dạng phức tạp và tiết kiệm chi phí thiết bị. Việc áp dụng kỹ thuật này cho gia công vật liệu da là hướng đi mới. Để đảm bảo chất lượng cắt, cần nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ như dòng điện, tốc độ tiến dao và chu kỳ làm việc đến hiện tượng carbon hóa và hiệu quả bóc tách vật liệu [4].

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG GIA CÔNG



Hình 1. Sơ đồ hệ thống máy cắt dây nóng

Hệ thống gia công bằng dây nóng được thiết kế gồm các thành phần chính:

- Dây nóng: Có khả năng chịu nhiệt cao và ổn định trong quá trình cắt.

- Nguồn DC ổn định: Cấp dòng điện gia nhiệt cho dây.

- Bộ điều khiển Arduino: Điều khiển tín hiệu tới các động cơ bước, nhận dữ liệu từ cảm biến nhiệt.

- Cảm biến nhiệt: Theo dõi nhiệt độ dây cắt, truyền tín hiệu về Arduino để điều chỉnh dòng.

- Khung máy: Chế tạo từ thanh inox, đảm bảo độ cứng và ổn định.

- Động cơ bước và vít me bi: Tạo chuyển động chính xác theo trục X và Y.

3. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Dây nóng hoạt động theo nguyên lý chuyển hóa điện năng thành nhiệt năng theo định luật Joule, [5]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Trong đó:

Q là nhiệt lượng sinh ra (J);
I là dòng điện chạy qua dây (A);
R là điện trở dây (Ω);
t là thời gian (s).

Để dây cắt đạt hiệu quả, cần đảm bảo nhiệt lượng đủ để làm mềm vật liệu da tại vùng tiếp xúc mà không gây cháy lan hoặc tổn hại lớp bề mặt. Vì vậy, dây phải được giữ ở mức nhiệt ổn định nhờ cảm biến nhiệt và điều khiển dòng điện hợp lý.

☞

4. THIẾT KẾ THÍ NGHIỆM

4.1. Các thông số khảo sát

- Dòng điện (IW): 2 A, 3 A, 4 A;

- Tốc độ tiến dao (FR): 100 mm/phút, 150 mm/phút, 200 mm/phút;

- Chu kỳ làm việc (DC): 50%, 60%, 70%.

4.2. Phương pháp đo

- Tỷ lệ carbon hóa (CW): Đo bằng xử lý ảnh vùng cắt (tính số điểm đen/trắng).

- Hiệu suất bóc tách (MRR): Khối lượng vật liệu da cắt được trên mỗi phút, tính bằng:

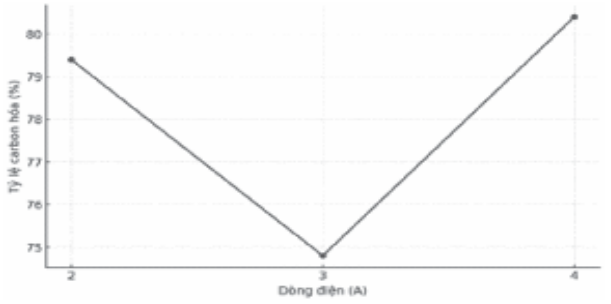
$$MRR = \frac{m}{t}$$

Trong đó: m là khối lượng vật liệu cắt được (g); t là thời gian cắt (phút).

5. XỬ LÝ CÁC DỮ LIỆU

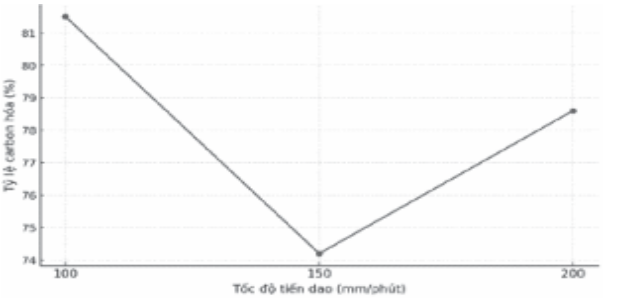
5.1. Tác động của dòng điện

Khi tăng dòng điện từ 2 A lên 4 A, hiện tượng carbon hóa tăng rõ rệt do nhiệt độ dây tăng nhanh. Với dòng lớn, dây dễ bị quá nhiệt, sinh khói và làm cháy sém vùng cắt.



Hình 2. Tác động của dòng điện đến tỷ lệ các bon hóa

5.2. Tác động của tốc độ tiến dao

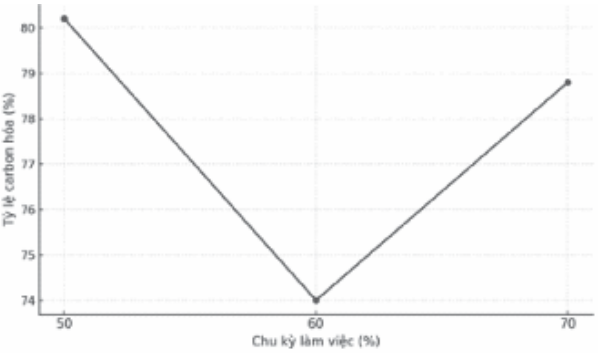


Hình 3. Tác động của tốc độ tiến dao đến tỷ lệ các bon hóa

Tốc độ thấp (100 mm/phút) làm vùng tiếp xúc kéo dài thì tăng nhiệt tích tụ dẫn đến carbon hóa cao. Tốc độ quá nhanh (200 mm/phút) lại gây đứt đoạn nếu dây chưa kịp nung chảy vật liệu. Mức trung bình (150 mm/phút) là tối ưu về độ mịn.

5.3. Tác động của chu kỳ làm việc

Chu kỳ thấp (50%) làm dây không đủ nóng đều, trong khi chu kỳ quá cao (70%) dễ gây quá nhiệt. Mức 60% là tối ưu để duy trì ổn định nhiệt độ dây trong quá trình cắt.



Hình 4. Tác động của chu kỳ đến tỷ lệ các bon hóa

6. KẾT LUẬN

- Phương pháp dây nóng là lựa chọn hiệu quả cho cắt vật liệu da với điều kiện kiểm soát chặt chẽ dòng điện và tốc độ tiến dao.

- Dòng điện là thông số ảnh hưởng mạnh nhất đến chất lượng cắt (carbon hóa), tiếp đến là tốc độ tiến dao.

- Chu kỳ làm việc ảnh hưởng đến độ ổn định nhiệt cần được điều chỉnh theo từng loại da.

- Hệ thống thí nghiệm sử dụng Arduino và cảm biến nhiệt cho phép kiểm soát tốt quá trình gia công.❖

Ngày nhận bài: **09/5/2025**
Ngày phản biện: **02/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Brooks, H. & Aitchison, D. (2008), "*Thermal Plastic Foam Cutting Mechanics*".
[2]. Ahn, D.G. et al. (2002), "*Investigation into thermal characteristics of hotwire cutting*".
[3]. Vasanth, S.&Muthuramalingam, T. (2021), "*Application of laser diode on leather cutting*".
[4]. Thangaraj, M.et al. (2021), "*Optimization using Taguchi – DEAR*". Materials, 14(6250).
[5]. D.Aitchison et al. (2006), "*Transient Temperature Effects in Hot-wire Cutting*".

TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU QUÁ TRÌNH GIA CÔNG VI-EDM VẬT LIỆU Ti6Al4V BẰNG ĐIỆN CỰC WC SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI - TOPSIS

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF MICRO-EDM MACHINING OF Ti6Al4V MATERIAL WITH WC ELECTRODE USING TAGUCHI - TOPSIS METHOD

Nguyễn Tiến Dũng
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
Email: dungnt@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình gia công EDM hợp kim titan Ti-6Al-4V bằng điện cực tungsten carbide (WC). Sử dụng phương pháp Taguchi kết hợp với kỹ thuật ra quyết định đa tiêu chí TOPSIS [1], tác giả đã xác định được tập thông số công nghệ tối ưu nhằm cải thiện chiều sâu gia công (Z) và giảm tốc độ mòn điện cực (TWR) [2]. Kết quả thực nghiệm cho thấy tổ hợp thông số tối ưu là V = 160V, C = 10nF, RPM = 400 vòng/phút. Bề mặt sau gia công có độ mịn cao, ít vi nứt và hạt bám, cho thấy tiềm năng ứng dụng trong chế tạo chi tiết chính xác.

Từ khóa: *Micro-EDM; Tối ưu hóa đa mục tiêu; Taguchi; Topsis; Ti-6Al-4V; Điện cực WC.*

ABSTRACT

The paper studies the multi-objective optimization method of EDM machining of titanium alloy Ti-6Al-4V using tungsten carbide (WC) electrode. Using the Taguchi method combined with the multi-criteria decision-making technique TOPSIS, the author has determined the optimal set of technological parameters to improve the machining depth (Z) and reduce the electrode wear rate (TWR). Experimental results show that the optimal parameter combination is V = 160V, C = 10nF, RPM = 400 rpm. The machined surface has high smoothness, few microcracks and grain adhesion, showing potential for application in manufacturing precision parts.

Keywords: *Micro-EDM; Multi-objective optimization; Taguchi; Topsis; Ti-6Al-4V; WC electrode.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gia công vi-EDM được xem là giải pháp tối ưu khi xử lý vật liệu khó cắt, điển hình như hợp kim titan Ti6Al4V [3]. Việc lựa chọn thông số công nghệ phù hợp để đảm bảo cả năng suất và chất lượng bề mặt là một bài toán phức tạp, nhất là trong điều kiện gia công chính xác vi mô. Do đó, nghiên cứu áp dụng các phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu là rất cần thiết.

2. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết bị và vật liệu

- Máy gia công: Hyper 10 Micro EDM;
- Vật liệu gia công: Ti6Al4V;
- Điện cực: Tungsten Carbide (WC), Ø 490 µm.

2.2. Các thông số thí nghiệm

Bố trí theo ma trận trực giao L9 (Taguchi), với ba yếu tố đầu vào: Điện áp (V): 120V, 140V, 160V; Điện dung (C): 100pF, 1000pF, 10nF; Tốc độ quay (RPM): 200, 400, 600 vòng/phút.

Bảng 1. Ma trận thực nghiệm và kết quả đo

Số TN	Điện áp (V)	Điện dung (nF)	Tốc độ quay (RPM)	Chiều sâu Z (mm)	TWR (mg/phút)
1	120	100	200	0.59	0.01
2	120	1000	400	1.16	0.04
3	120	10	600	1.15	0.08
4	140	100	400	0.71	0.04
5	140	1000	600	0.9	0.05
6	140	10	200	1.31	0.04
7	160	100	600	0.62	0.01
8	160	1000	200	1.17	0.04
9	160	10	400	1.84	0.08

2.3. Phương pháp đánh giá

- Dùng AHP xác định trọng số tiêu chí [4]: Z (0.667), TWR (0.333);

- Sử dụng TOPSIS để tính chỉ số C* [5], xác định thứ hạng tối ưu;

- Kết hợp phân tích tỷ số S/N để xác nhận tính ổn định.

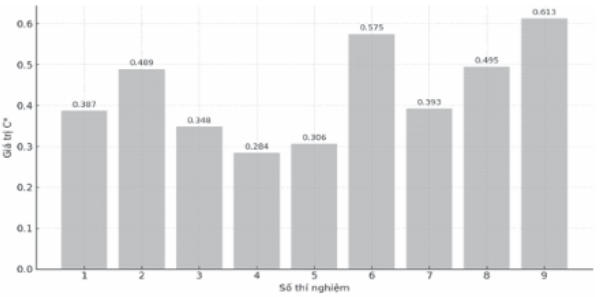
3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

3.1. Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu

- Điểm C* cao nhất tại thí nghiệm số 9: V = 160V, C = 10nF, RPM = 400;

- Giá trị tối ưu thu được: Z = 1,84 mm, TWR = 0,08 mg/min;

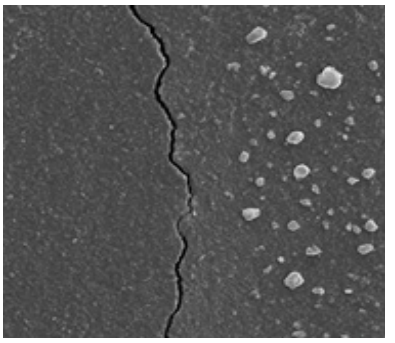
- Chênh lệch giữa giá trị tính toán và thực nghiệm nhỏ hơn 4%.



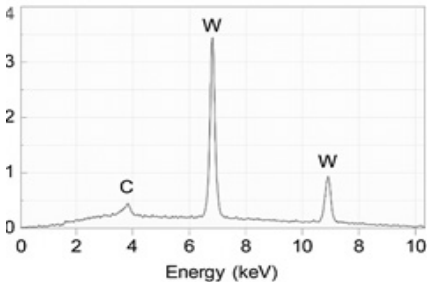
Hình 1. Biểu đồ giá trị C theo từng tổ hợp thí nghiệm*

3.2. Ảnh hưởng đến bề mặt gia công

Sau khi áp dụng tổ hợp thông số công nghệ tối ưu (V = 160V, C = 10nF, RPM = 400 vòng/phút), bề mặt lỗ gia công bằng vi-EDM với điện cực WC đã được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) và phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX).



Hình 2. Ảnh SEM cho thấy ít vi nứt và hạt bám



Hình 3. Phổ EDX bề mặt sau gia công

Hình 2 cho thấy bề mặt gia công tương đối đồng đều, xuất hiện rất ít vết nứt tế vi và hạt bám so với các tổ hợp thông số chưa tối ưu. Các vết nứt nhỏ thường có xu hướng phân bố rải rác theo hướng nhiệt, chủ yếu hình thành do ứng suất dư nhiệt lớn tại vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ). Ngoài ra, một số hạt điện cực có kích thước vi mô bị bám dính trên bề mặt, nhưng mật độ thấp và không tạo thành lớp phủ dày, cho thấy quá trình phóng tia lửa ổn định.

Cấu trúc bề mặt cũng cho thấy sự hình thành các lỗ rỗng nhỏ do hiện tượng nóng chảy và làm nguội nhanh tại vùng gia công. Tuy nhiên, mật độ các lỗ rỗng này thấp và không ảnh hưởng đáng kể đến chức năng cơ học của lỗ gia công.

Hình 3 chứng minh sự thay đổi cục bộ thành phần hóa học bề mặt, ghi nhận dấu vết của nguyên tố vonfram (W) và carbon (C) từ điện cực WC. Sự xuất hiện của các nguyên tố này là bằng chứng cho việc tái lắng đọng phần vật liệu điện cực lên bề mặt chi tiết, đồng thời làm thay đổi tính chất vật lý của lớp bề mặt sau gia công.

4. KẾT LUẬN

- Tối ưu hóa bằng phương pháp Taguchi - TOPSIS mang lại hiệu quả rõ rệt về chiều sâu cắt và độ mòn điện cực. Giảm đáng kể vi nứt và các khuyết tật bề mặt.

- Tổ hợp thông số tối ưu được xác định là V = 160V, C = 10nF, RPM = 400rpm.

- Bề mặt sau gia công bằng điện cực WC đạt chất lượng tốt, ít vi nứt, phù hợp ứng dụng trong gia công chính xác.

- Tăng tiềm năng ứng dụng trong các chi tiết cơ khí yêu cầu độ chính xác và bề mặt chất lượng cao, đặc biệt trong lĩnh vực y sinh hoặc hàng không vũ trụ.❖

Ngày nhận bài: **12/5/2025**
Ngày phản biện: **29/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Newman, S.T. và Ho, K.H., 2003, "*State of the art electrical discharge machining (EDM)*". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(13), tr.1287-1300.

[2]. Phan, N.H., Muthuramalingam, T., Pham, V.D., Shirguppikar, S., Nguyen, N.T., 2022, "*Multi-objective optimization of micro EDM using TOPSIS method with tungsten carbide electrode*". Sādhanā, 47, tr.133.

[3]. Manivannan, R. và Kumar, M.P., 2016, "*Multi-attribute decision making of cryogenically cooled Micro-EDM drilling process parameters using TOPSIS method*". Materials and Manufacturing Processes, DOI:10.1080/10426914.2016.1176182.

[4]. Phan, N.H., Dong, P.V., Dung, H.T., et al., 2021, "*Multi-object optimization of EDM by Taguchi-DEAR method using AlCrNi coated electrode*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116, tr.1429-1435.

[5]. Pham, D.S.S. và Dimov, D.T., 2004, "*Micro-EDM – recent developments and research issues*". Journal of Materials Processing Technology, 149, tr.50-57.

TỰ ĐỘNG HÓA QUÁ TRÌNH THIẾT KẾ THIẾT BỊ CẤP PHÔI TỰ ĐỘNG THEO NGUYÊN LÝ RUNG ĐỘNG

AUTOMATING THE DESIGN PROCESS OF VIBRATORY BOWL FEEDER

Nguyễn Văn Mùi
Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
Email: nvmui@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống cấp phôi tự động theo nguyên lý rung động được sử dụng rộng rãi trong sản xuất hiện đại ngày nay cho các loại phôi rời có trọng lượng và kích thước nhỏ. Thiết kế, chế tạo thiết bị này đã và đang được quan tâm nhằm giúp phôi đi đúng hướng và đúng nhịp sản xuất. Trong hệ thống cấp phôi tự động có rất nhiều các thành phần như phễu rung cấp phôi, lò xo lá tạo dao động cho phễu, các nam châm điện kết hợp với lò xo lá tạo dao động cho phễu. Yếu tố quyết định đến khả năng cấp phôi là phễu rung trên đó có chứa các rãnh dẫn hướng, các cơ cấu điều hướng đảm bảo cho quá trình di chuyển của phôi. Bài báo này trình bày quá trình tính toán thiết kế, mô hình hóa các thiết bị trên môi trường số cũng như tự động hóa quá trình thiết kế thông quá các tham số sử dụng phần mềm CATIA.

Từ khóa: *Phễu rung; Thiết bị rung cấp phôi; Cấp phôi tự động; Tự động hóa thiết kế.*

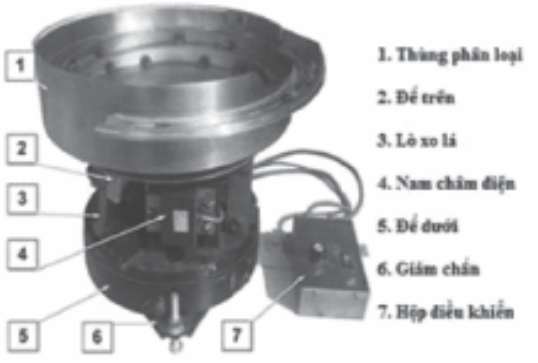
ABSTRACT

Automatic bowl feeding system based on vibration principle are widely used in modern manufacturing for handling small and lightweight discrete parts. The design and development of this system has attracted significant attention to ensure that parts are oriented and fed correctly and consistently in line with production requirements. Automatic bowl feeding system typically includes components such as vibratory bowl feeder, oscillation-generating springs, and electromagnets that, together with the springs, create vibrations to move the parts. A decisive factor influencing feeding performance is the design of the vibratory bowl, which contains guiding grooves and mechanisms to facilitate the smooth and accurate part movement. This paper presents the processing of calculating, designing, the modeling of these components in a digital environment, as well as the automation of the design process using design software such as CATIA.

Keywords: *Bowl feeder; Vibratory bowl feeder; Vibration; Automatic Design.*

1. GIỚI THIỆU

Đối với các loại phôi rời có trọng lượng và kích thước nhỏ thường sử dụng các thiết bị cấp phôi rung động (Vibration Bowl Feeder - VBF), tỷ lệ thiết bị này chiếm 80% trong các nhà máy sản xuất hiện nay [1]. VBF là một thiết bị có kết cấu đơn giản nhưng hiệu quả và năng suất cao, đảm bảo đúng nhịp sản xuất. Kết cấu và nguyên lý chung của thiết bị như hình 1. Trong đó bao gồm: thùng phân loại phôi hay còn gọi là phễu chứa (1) được gắn lên đế trên (2). Đế trên (2) được gắn lên trên ba lò xo lá (3) nhờ lực hút của nam châm điện (4) tạo ra các chuyển động xoay và chuyển động lên xuống tạo ra chuyển động nhảy của phôi trên rãnh dẫn. Thông thường, nam châm điện bao gồm hai phần, một phần cố định nằm ở dưới (5) và mang cuộn dây, phần còn lại lắp cố định để trên (2) và di chuyển cùng với đế trên (2) và phôi. Dòng điện trong cuộn dây sẽ tạo ra lực từ giữa hai phần của nam châm điện, bằng các tác động hút, nhả giữa hai phần của nam châm, lực này tác động làm rung động cả phần đế trên phôi. Lực tác dụng giữa hai phần của nam châm được điều khiển bởi mạch điều khiển dòng điện áp từ bộ điều khiển (7). Các giảm chấn (6) có tác dụng triệt tiêu các rung động ảnh hưởng đến các thiết bị khác. Tốc độ di chuyển của phôi phụ thuộc rất nhiều vào các yếu tố, trong đó có dao động của phễu rung.

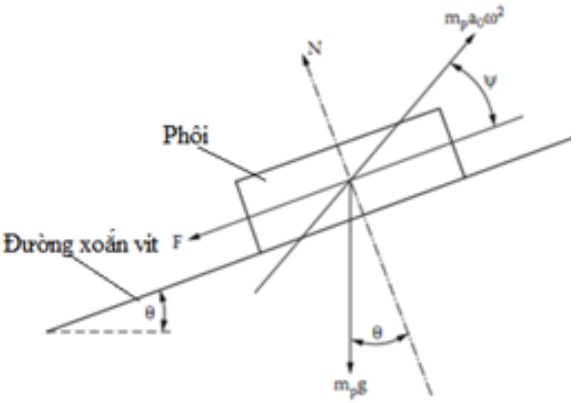


Hình 1. Thiết bị cấp phôi tự động

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT HỆ THỐNG CẤP PHÔI TỰ ĐỘNG THEO NGUYÊN LÝ RUNG

2.1. Các lực tác dụng lên phôi trên máng dẫn

Trong quá trình phân tích trạng thái của phôi trên máng, biên độ dao động tăng dần từ 0. Khi biên độ nhỏ, phôi gần như không di chuyển trên máng dẫn do lực quán tính của phôi nhỏ hơn lực ma sát F giữa phôi và máng dẫn. Trên hình 2, ta thấy rằng lực quán tính lớn nhất tác dụng lên phôi khi máng dẫn đạt vị trí giới hạn. Lực này được chia làm hai thành phần song song và pháp tuyến lần lượt là: $m_p.a_0.\omega^2\cos\psi$ và $m_p.a_0.\omega^2.\sin\psi$.



Hình 2. Sơ đồ lực tác dụng lên phôi và rãnh xoắn trong phễu [2], [4], [9], [10]

Điều kiện để phôi trượt lên trên là:

$$m_p.a_0.\omega^2.\cos\psi > m_p.g.\sin\theta + F \quad (2.1)$$

Trong đó: N là phản lực.

Lực ma sát:

$$F\ \mu_s.N = \mu_s.(m_p.g.\cos\theta - m_p.a_0.\omega^2.\sin\psi) \quad (2.2)$$

Với μ_s là hệ số ma sát tĩnh giữa phôi và máng dẫn.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Từ phương trình (2.1) và (2.2), điều kiện để phôi đi lên là:

$$\frac{a_0.\omega^2}{g} > \frac{\mu_s \cos\theta + \sin\theta}{\cos\psi + \mu_s \sin\psi} \quad (2.3)$$

Tương tự như vậy, điều kiện để phôi di chuyển trượt xuống là:

$$\frac{a_0.\omega^2}{g} < \frac{\mu_s \cos\theta - \sin\theta}{\cos\psi - \mu_s \sin\psi} \quad (2.4)$$

Trạng thái hoạt động của phễu rung được biểu thị dưới dạng gia tốc pháp tuyến của máng dẫn không thứ nguyên A_n/g_n. Trong đó, A_n là gia tốc pháp tuyến của máng dẫn ($A_n = a_n\,\omega^2 = a_0\,\omega^2 \sin\psi$), g_n gia tốc trọng trường theo phương pháp tuyến ($g_n = g.\cos\theta$) và $g = 9.81 m/s^2$ là gia tốc trọng trường. Vậy, ta có:

$$\frac{A_n}{g_n} = \frac{a_0\omega^2 \sin\psi}{g\cos\psi} \quad (2.5)$$

Thay (2.5) vào (2.3) ta có, điều kiện để phôi đi lên là:

$$\frac{A_n}{g_n} > \frac{\mu_s + \tan\theta}{\cot\psi + \mu_s} \quad (2.6)$$

Điều kiện để phôi di chuyển lùi xuống là:

$$\frac{A_n}{g_n} > \frac{\mu_s - \tan\theta}{\cot\psi - \mu_s} \quad (2.7)$$

So sánh phương trình (2.6) và (2.7), ta thấy rằng điều kiện để phôi đi lên là:

$$\tan\psi > \frac{\tan\theta}{\mu_s^2}$$

Khi θ quá nhỏ, ta có:

$$\tan\psi > \frac{\theta}{\mu_s^2} \quad (2.8)$$

Với biên độ rung động đủ lớn, phôi sẽ di chuyển trên máng dẫn với trạng thái trượt và nhảy theo đường dẫn. Điều này chỉ xảy ra khi phản lực N giữa phôi và máng dẫn bằng 0. Theo hình 2.5, ta có:

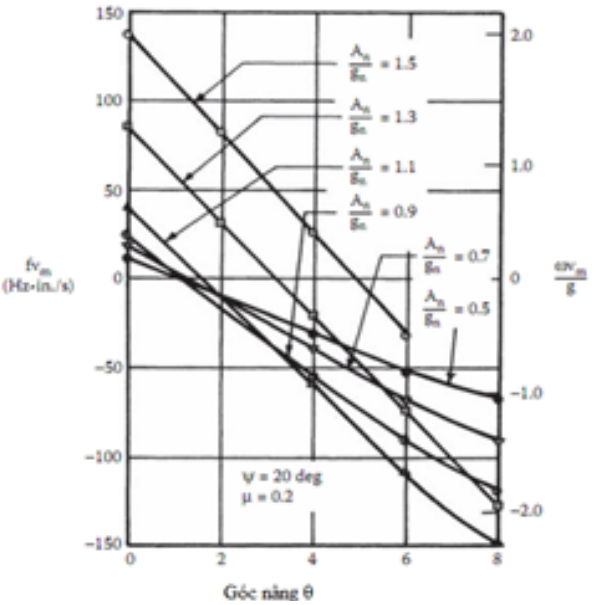
$$N = m_p g\cos\theta - m_p a_0 \omega^2 \sin\psi \quad (2.9)$$

Do đó, để phôi rời khỏi máng dẫn ta có:

$$\frac{a_0\omega^2}{g} > \frac{\cos\theta}{\sin\psi} \text{ hay } \frac{A_n}{g_n} > 1 \quad (2.10)$$

2.2. Các thông số ảnh hưởng đến quá trình di chuyển của phôi

2.2.1. Ảnh hưởng của thông số kết cấu (góc nghiêng rãnh xoắn θ) [4]



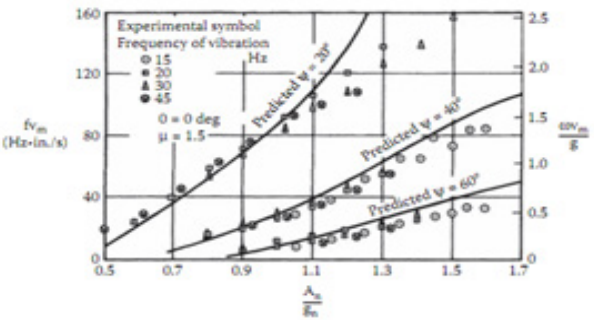
Hình 3. Ảnh hưởng của góc nghiêng rãnh xoắn θ tới vận tốc vận chuyển phôi [4]

Hình 3 cho thấy ảnh hưởng của góc nghiêng rãnh xoắn θ lên vận tốc vận chuyển với ☞

tỷ số gia tốc A_n/g_n khác nhau tại giá trị của μ là 0,2. Kết quả cho thấy vận tốc cao nhất đạt được khi góc nghiêng rãnh xoắn θ = 0 và phôi chuyển động lên trên luôn đạt được khi góc nghiêng rãnh xoắn θ nhỏ. Các máy thiết kế cần thiết phải có góc nghiêng rãnh xoắn hiệu quả θ = 3 ÷ 4 °C.

2.2.2. Ảnh hưởng của tần số dao động

Trong hình 4, thử nghiệm được tiến hành với ba góc giữa phương của lực quán tính và phương rung động (góc rung động) ψ = 20°, 40°, 60°. Quá trình thử nghiệm được tiến hành với các tần số thấp f = 15, 20, 30, 45 Hz, khi đó fv_m được sử dụng như giá trị đo của vận tốc băng tải. Các tác giả cho thấy rằng, kết quả này phù hợp với kết quả các nghiên cứu lý thuyết. Kết quả cho thấy vận tốc di chuyển của phôi cao do đó tốc độ cấp liệu cao. Tuy nhiên, gia tốc của máng dẫn là không đổi, có nghĩa là biên độ dao động của máng thay đổi. Qua đây cũng cho thấy tần số hoạt động tốt nhất cho quá trình cấp phôi dao động từ 30 đến 60Hz.



Hình 4. Ảnh hưởng của góc ψ, tỷ số gia tốc, tần số f, góc nghiêng θ, hệ số ma sát lên vận tốc vận chuyển của phôi [4]

2.2.3. Ảnh hưởng của gia tốc máng dẫn [4]

Hình 4 cho thấy khi mà tỷ số gia tốc tăng lên thì vận tốc vận chuyển phôi tăng lên. Tại một số điểm trên đồ thị thì tỷ số này tăng lên đột biến và điều này ảnh hưởng đáng kể tới quá trình cấp phôi. Người ta giải thích hiện tượng này như sau: nếu tỷ số gia tốc pháp tuyến A_n và gia tốc trọng trường theo phương pháp tuyến g_n này tăng lên tới ($A_n/g_n > 1,0$) thì phôi "bay" lên một lần trong suốt chu kỳ như các mô tả trước đó. Đầu tiên, tốc độ va đập của phôi lên máng dẫn nhỏ, khi gia tốc của máng dẫn tăng lên, tốc độ va đập cũng tăng cho đến một thời điểm nào đó phôi bắt đầu bay lên. Trong trường hợp này, tốc độ cấp phôi sẽ không ổn định. Các nghiên cứu lý thuyết không còn đúng trong trường hợp này.

2.2.4. Ảnh hưởng của góc giữa lực quán tính và mặt phẳng nghiêng ψ [4]

Hình 4 cho thấy vận tốc vận chuyển phôi vm dễ thay đổi khi ta thay đổi góc giữa lực quán tính và mặt phẳng nghiêng (góc rung động) ψ. Ta có thể thấy rõ sự ảnh hưởng của nó trên hình 2.4, nó biểu thị điều kiện góc tối ưu của góc rung động. Hình 2.6 là mối quan hệ giữa hệ số ma sát μ_s và góc rung động tối ưu ψ_{opt} tại giá trị $A_n/g_n = 1,2$.

3. MÔ HÌNH HÓA THIẾT BỊ

3.1. Tính toán thiết kế thiết bị

Thông số	Giá trị
Đường kính phôi (mm)	20
Chiều cao phôi (mm)	9.54
Thể tích của phôi V_P (mm^3)	1547
Tốc độ của phôi V_P (mm/s)	173
Góc ngiêng của phễu rung β (độ)	1.5
Chiều dày vành a (mm)	2
Bề rộng rãnh xoắn b (mm)	35
Bước xoắn phễu rung t (mm)	30
Đường kính phễu rung D (mm)	370
Chiều cao phễu rung H (mm)	100
Chiều cao bước xoắn h (mm)	70
Đường kính ngoài đế đỡ bowl d_1 (mm)	240
Đường kính trong đế đỡ bowl d_2 (mm)	180
Chiều dày đế đỡ bowl b_3 (mm)	25
Đường kính ngoài đế trên lò xo lá d'_1 (mm)	270
Đường kính trong đế trên lò xo lá d'_2 (mm)	50
Chiều dày đế trên lò xo lá b'_3 (mm)	15
Đường kính đế D_1 (mm)	290
Chiều cao đế H_1 (mm)	70
Góc ngiêng của lò xo lá α (độ)	11

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

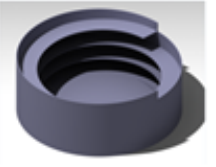
Để thực hiện quá trình tự động hóa thiết kế, trước tiên dựa vào kết quả tính toán ban đầu với các điều kiện đầu vào như vật liệu phôi, năng suất cấp phôi, kích thước, trọng lượng phôi tiến hành tính toán các kích thước của hệ thống như bảng trên.

3.2. Mô hình hóa thiết bị

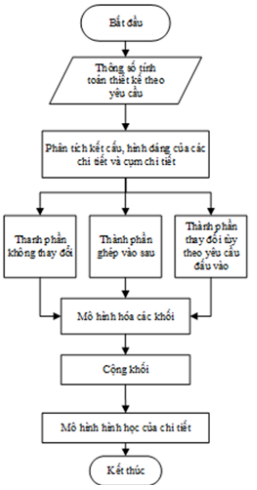
3.2.1. Mô hình hóa chi tiết

Để mô hình hóa chi tiết, sử dụng phần mềm Catia với các modul:

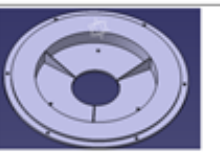
- Part Design: Thiết kế các chi tiết trong hệ thống;
- Asembly Design: Tạo lập sản phẩm lắp ghép;
- Wireframe and Surface Design: Thiết kế khung dây và bề mặt.

Thông số	Hình ảnh
- Đường kính phễu rung : 370 mm - Chiều cao của phễu rung : 100 mm - Bước xoắn của máng rung : 30 mm - Bề rộng rãnh xoắn : 35mm - Góc nghiêng rãnh xoắn: 1.5^0	

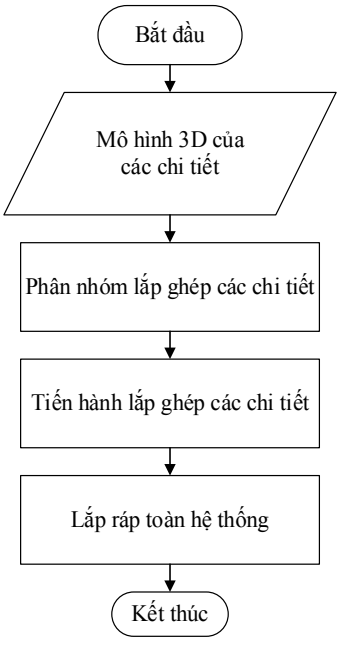
Hình 6. Phễu rung cấp nắp chai cao su



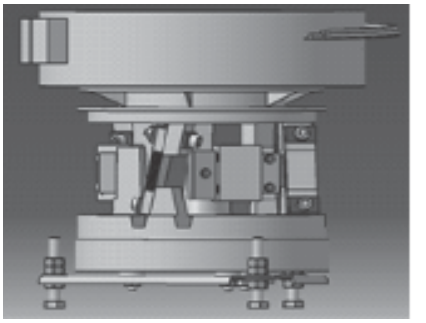
Hình 5. Quy trình thực hiện mô hình hóa phễu rung

Thông số	Hình ảnh
❖ *Đế gá phễu rung :* + Đường kính ngoài : 240 mm + Đường kính trong : 180 mm + Chiều cao : 27 mm + Lỗ ren lắp ghép : M7 với M6	 *Hình 7. Đế gá phễu rung*
❖ *Đế trên lò xo lá :* + Đường kính ngoài : 270 mm + Đường kính trong : 50mm + Chiều cao : 115 mm	 *Hình 8| Đế trên lò xo lá*

3.3. Lắp ráp hệ thống



Hình 9. Quy trình lắp ráp hệ thống

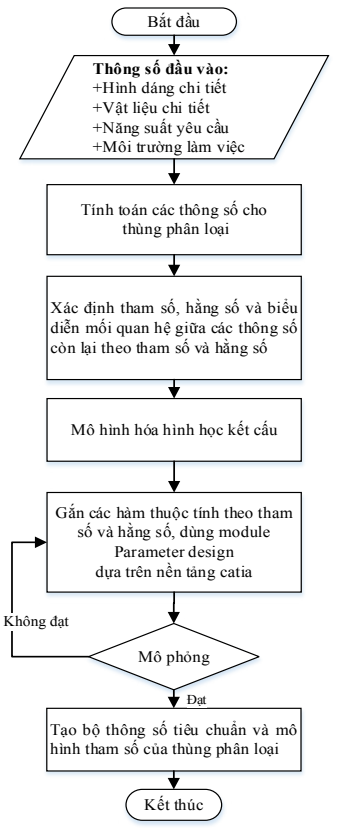


Hình 10. Kết quả lắp ráp hệ thống rung cấp nắp chai vaccine

Từ những chi tiết được mô hình hóa trên Modul Part Design tiến hành phân tách, lắp ghép thành các cụm chi tiết hay nhóm lắp ghép. Từ các cụm chi tiết này thành hệ thống cấp phôi tự động theo nguyên lý rung động trên môi trường số.

4. TỰ ĐỘNG HÓA THIẾT KẾ BẰNG THAM SỐ SỬ DỤNG CATIA

Từ các thông số đầu vào như hình dạng chi tiết, thông số vật liệu, năng suất làm việc cũng như môi trường làm việc, xây dựng các hàm tham số phụ thuộc biểu thị mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và thông số đầu ra cần tính toán. Gắn các hàm thuộc tính theo tham số và hằng số. Sử dụng modul Parameter design trong phần mềm Catia để đưa ra kết quả là kết cấu của các cụm chi tiết.



Hình 11. Quy trình tham số hóa



Hình 12. Kết quả tham số hóa

5. KẾT LUẬN

Hệ thống cấp phôi tự động theo nguyên lý rung động đã và đang được áp dụng rộng rãi trong sản xuất công nghiệp, hiện nay thường được áp dụng cho các loại phôi có trọng lượng và kích thước nhỏ.

Nghiên cứu lý thuyết động lực học của phôi cho biết được các lực tác động lên phôi nằm và di chuyển trên đường dẫn hướng. Nhờ các lực tác động đó, phôi sẽ có trạng thái trượt và nhảy khi di chuyển trên máng dẫn. Đồng thời cũng chỉ rõ điều kiện để phôi có thể di chuyển đi lên và đi đúng hướng.

Năng suất cấp phôi, thể hiện qua số lượng phôi đúng hướng cấp được phụ thuộc vào góc nghiêng rãnh xoắn rãnh xoắn, tần số rung, biên độ dao động, hệ số ma sát giữa phôi và kênh dẫn, kết cấu và cấu hình hệ thống bẫy phân loại. Từ đó làm cơ sở để xác định bài toán nghiên cứu giới hạn cho phôi là nắp chai thuốc vaccine bằng cao su, ma sát cho cặp vật liệu là cao su và inox, dạng điều khiển theo biên độ, cố định tần số tương ứng với dạng thiết bị làm việc ở chế độ chủ động cộng hưởng.

Đã xây dựng quy trình và giải pháp tự động hóa thiết kế cho mô hình thiết bị cấp phôi dạng phễu rung bao gồm mô hình hình học, mô

hình vật liệu và mô hình phần tử nhằm cung cấp dữ liệu cho các quá trình phân tích và chế tạo.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**
Ngày phản biện: **26/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bộ Y Tế (2014), "*Hướng dẫn thực hành tốt sản xuất thuốc*", vol. 986.
[2]. Nguyễn Phương, Nguyễn Thị Phương Giang (2005), "*Cơ sở tự động hóa trong ngành Cơ khí*". NXB. Khoa học Kỹ thuật.
[3]. Trần Văn Địch (2006), "*Tự động hóa quá trình sản xuất*". NXB. Khoa học Kỹ thuật.
[4]. G. Boothroyd (2005), "*Assembly automation and product design*", vol. 66.
[5]. D. Hofmann, H. Huang, and G. Reinhart (2013), "*Automated Shape Optimization of Orienting Devices for Vibratory Bowl Feeders*". J. Manuf. Sci. Eng., vol. 135, no. 5, p. 51017-1-51017-6.
[6]. H.-W. Ma and G. Fang (2015), "*Kinematics analysis and experimental investigation of an inclined feeder with horizontal vibration*". Mech. Eng. Sci, pp. 1-11.
[7]. E. Mucchi, R. Di Gregorio, and G. Dalpiaz (2011), "*Elastodynamic analysis of vibratory bowl feeders: Modeling and experimental validation*". Mech. Mach. Theory, vol. 60, pp. 60-72.
[8]. R. Chen, L. Chen, X. Wang, and X. Chen (2011), "*Dynamic design and simulation of a vibratory hopper*". 2011 2nd Int. Conf. Artif. Intell. Manag. Sci. Electron. Commer. AIMSEC 2011 - Proc., no. October, pp. 3935-3938.
[9]. Châu Mạnh Lực, Phạm Song (2003), "*Trang bị công nghệ và cấp phôi tự động*". Đại học Bách Khoa Đà Nẵng.
[10]. L. Han and J. X. Gao (2010), "*A Study on the Modelling and Simulation of Part Motion in Vibratory Feeding*". Trans Tech Publ. Switz., vol. 34-35, pp. 2006-2010.
[11]. P. C. P. Chao and C. Y. Shen (2007), "*Dynamic modeling and experimental verification of a piezoelectric part feeder in a structure with parallel bimorph beams*". Ultrasonics, pp. 205-218.
[12]. X. Ding and J. S. Dai (2008), "*Characteristic equation-based dynamics analysis of vibratory bowl feeders with three spatial compliant legs*". IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 5, no. 1, pp. 164-175.
[13]. J. A. Vilán Vilán, A. Segade Robleda, P. J. García Nieto, and C. Casqueiro Placer (2009), "*Approximation to the dynamics of transported parts in a vibratory bowl feeder*". Mech. Mach. Theory, vol. 44, no. 12, pp. 2217-2235.

TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU QUÁ TRÌNH GIA CÔNG DA BẰNG DÂY NÓNG SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI – DEAR

MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION OF HOT WIRE LEATHER PROCESSING USING TAGUCHI METHOD - DEAR

Trần Văn Mạnh
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
Email: tvmanh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu cho quá trình gia công vật liệu da bằng dây nóng sử dụng kỹ thuật Taguchi kết hợp với phương pháp DEAR (Data Envelopment Analysis based Ranking). Hai thông số chất lượng được xem xét là tỷ lệ carbon hóa [1] và tốc độ bóc vật liệu [2]. Dựa trên ma trận thực nghiệm trực giao L9, các giá trị MRPI (chỉ số tổng hợp hiệu suất) được tính toán nhằm tìm ra tổ hợp thông số tối ưu [3]. Kết quả cho thấy tổ hợp gồm dòng điện 4A, tốc độ tiến dao 200 mm/phút và chu kỳ làm việc 70% đạt chỉ số MRPI cao nhất với sai số dự đoán 3,7%.

Từ khóa: *Tối ưu đa mục tiêu; DEAR; Taguchi; Gia công dây nóng; Vật liệu da; Carbon hóa.*

ABSTRACT

The paper presents a multi-objective optimization method for hot wire machining of leather materials using the Taguchi technique combined with the DEAR (Data Envelopment Analysis based Ranking) method. The two quality parameters considered are the carbonization ratio [1] and the material removal rate [2]. Based on the L9 orthogonal experimental matrix, the MRPI (composite performance index) values were calculated to find the optimal parameter combination [3]. The results show that the combination of 4A current, 200 mm/min feed rate and 70% duty cycle achieves the highest MRPI index with a prediction error of 3.7%.

Keywords: *Multi-objective optimization; DEAR; Taguchi; Hot wire machining; Leather materials; Carbonization.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gia công vật liệu da trong công nghiệp thường yêu cầu độ chính xác cao và hạn chế các tác động nhiệt không mong muốn. Phương pháp gia công bằng dây nóng là một lựa chọn tiềm năng, tuy nhiên để đạt được hiệu suất tối ưu cần phải điều chỉnh các thông số công nghệ như dòng điện (IW), tốc độ tiến dao (FR) và chu kỳ làm việc (DC) [4].

Việc tối ưu hóa một lúc nhiều chỉ tiêu (vừa giảm carbon hóa, vừa tăng tốc độ bóc vật liệu) đặt ra yêu cầu sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa đa mục tiêu. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp DEAR trên nền tảng ma trận thực nghiệm Taguchi L9, nhằm tìm ra tổ hợp thông số tốt nhất cho chất lượng cắt và hiệu suất.

2. THIẾT KẾ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

2.1. Ma trận thực nghiệm Taguchi L9

Ba thông số công nghệ được khảo sát ở ba mức, sắp xếp theo ma trận trực giao L9.

Bảng 1. Ba thông số công nghệ đầu vào

Thí nghiệm	IW (A)	FR (mm/phút)	DC (%)
1	2	100	50
2	2	150	60
3	2	200	70
4	3	100	60
5	3	150	70
6	3	200	50
7	4	100	70
8	4	150	50
9	4	200	60

2.2. Các chỉ số đầu ra

Tỷ lệ carbon hóa (CW): Tính toán bằng tỷ lệ ảnh điểm đen trong vùng cắt qua xử lý ảnh.

MRR (g/phút): Khối lượng da cắt được chia cho thời gian gia công.

Bảng 2. Dữ liệu đầu ra

Thí nghiệm	CW (%)	MRR (g/phút)
1	80.890	0.063
2	79.893	0.079
3	77.364	0.099
4	72.430	0.075
5	70.548	0.134
6	79.483	0.102
7	81.232	0.145
8	77.647	0.134
9	82.354	0.174

3. PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU HÓA DEAR

3.1. Cơ sở lý thuyết

Phương pháp DEAR là biến thể đơn giản của kỹ thuật đánh giá hiệu suất, áp dụng tốt cho các bài toán có cả chỉ tiêu cần tối đa hóa (MRR) và tối thiểu hóa (CW), [5].

- Với chỉ tiêu cần tối thiểu hóa (CW), sử dụng công thức:

$$CW_{norm} = \frac{1}{CW_i} \Big/ \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{CW_j}$$

- Với chỉ tiêu cần tối đa hóa (MRR), sử dụng:

$$MRR_{norm} = \frac{MRR_i}{\sum_{j=1}^{n} MRR_j}$$

- Chỉ số MRPI cho mỗi thí nghiệm được tính theo:

$$MRPI_i = CW_{norm(i)} + MRR_{norm(i)}$$

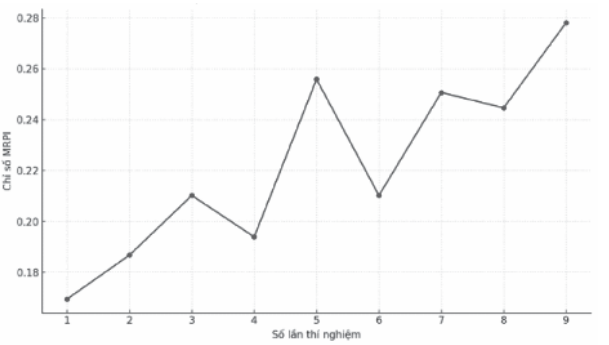
3.2. Kết quả tính toán

Bảng 3. Kết quả các thí nghiệm

Thí nghiệm	CWnorm	MRRnorm	MRPI
1	0.1068	0.0627	0.1695
2	0.1082	0.0786	0.1868
3	0.1117	0.0985	0.2102
4	0.1193	0.0746	0.1939
5	0.1225	0.1333	0.2558
6	0.1087	0.1015	0.2102
7	0.1064	0.1443	0.2507
8	0.1113	0.1333	0.2446
9	0.1049	0.1731	0.2780

4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ VÀ TỐI ƯU HÓA

4.1. Biểu đồ chỉ số MRPI theo từng thí nghiệm



Hình 1. Biểu đồ chỉ số MRPI

4.2. Tổ hợp thông số tối ưu

Dựa trên giá trị MRPI lớn nhất (Thí nghiệm số 9), ta xác định tổ hợp thông số tối ưu như sau:

Bảng 4. Thông số tối ưu hóa

Thông số	Giá trị tối ưu
Dòng điện IW (A)	4 A
Tốc độ tiến dao FR (mm/phút)	200
Chu kỳ làm việc DC (%)	70

4.3. Kiểm tra sai số dự đoán

Giá trị MRPI cao nhất là 0,2780, giá trị MRPI dự đoán trung bình là 0,2678, sai số:

$$\epsilon = \frac{0{,}2780 - 0{,}2678}{0{,}2780} \times 100\% \approx 3{,}7\%$$

Từ giá trị ϵ chỉ ra nhỏ hơn ngưỡng 5% thì đảm bảo độ chính xác của mô hình tối ưu.

5. KẾT LUẬN

- Phương pháp Taguchi - DEAR là công cụ đơn giản, hiệu quả trong tối ưu hóa đa mục tiêu cho gia công dây nóng.

- Tổ hợp thông số tối ưu giúp đồng thời giảm hiện tượng cháy (CW) và tăng năng suất bóc vật liệu (MRR).

- Sai số dự đoán dưới 5% cho thấy độ tin cậy cao của mô hình.

- Phương pháp này mở rộng áp dụng cho nhiều bài toán gia công vật liệu phi truyền thống khác.❖

Ngày nhận bài: **12/5/2025**
Ngày phản biện: **03/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Brooks, H. & Aitchison, D. (2008), "*Thermal Plastic Foam Cutting Mechanics*".
[2]. Ahn, D.G. et al. (2002), "*Investigation into thermal characteristics of hotwire system*".
[3]. Vasanth, S. & Muthuramalingam, T. (2021), "*Application of laser diode on leather cutting*".
[4]. Thangaraj, M. et al. (2021), "*Optimization of AWJM using Taguchi – DEAR*". Materials, 14(6250).
[5]. Aitchison, D. et al. (2006), "*Feed-force Relationships in Hot-wire Cutting*".

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ VẬN HÀNH ĐẾN ĐẶC TÍNH HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC TRÊN Ô TÔ ĐIỆN

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF TRANSMISSION SYSTEMS ON ELECTRIC CAR

Vũ Tiến Đại*, Hoàng Trần Đăng, Đỗ Hoàng Lãm, Đỗ Tuấn Anh, Trần Đức Nghĩa
Khoa Công nghệ Kỹ thuật ô tô, Trường Đại học Đại Nam
**Email: daivt@dainam.edu.vn*

TÓM TẮT

Ô tô điện ngày càng được sử dụng phổ biến ở trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Các nghiên cứu từ lý thuyết đến thực nghiệm trên ô tô điện cũng được chú trọng và tập trung nhiều hơn. Bài báo này tập trung nghiên cứu thực nghiệm, thực hiện khảo sát, tính toán, xác định ảnh hưởng của vị trí bàn đạp ga đến đặc tính của động cơ điện, công suất, mô men và tốc độ vòng tua của bánh xe. Kết quả nghiên cứu thể hiện mối quan hệ của công suất, mô men động cơ điện và tốc độ bánh xe theo vị trí bàn đạp ga. Qua đó đánh giá được các điểm làm việc cực đại của động cơ điện và khả năng tăng tốc của xe điện. Các thông số đo được xác định dựa trên mô hình chế tạo thực tế gồm bộ điều khiển, động cơ DC, pin cao áp, hệ thống truyền lực, cầu chủ động và bánh xe.

Từ khóa: *Đặc tính của động cơ điện; Ô tô điện; Bàn đạp ga; Động cơ DC.*

ABSTRACT

Electric cars are increasingly popular in the world as well as in Vietnam. Research from theory to experiment on electric cars is also focused and concentrated more. This article focuses on experimental research, conducting surveys, calculations, determining the influence of the accelerator pedal position on the characteristics of the electric motor, power, torque and wheel speed. The research results show the relationship between the power, torque of the electric motor and wheel speed according to the accelerator pedal position. Thereby, the maximum operating points of the electric motor and the acceleration ability of the electric vehicle are evaluated. The measured parameters are determined based on the actual manufacturing model including the controller, DC motor, high voltage battery, transmission system, driving axle and wheel.

Keywords: *Characteristics of electric motors; Electric vehicle; Accelerator pedal; DC motor.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống truyền động trên ô tô được xem như cầu nối giữa động cơ với bánh xe. Đảm bảo việc truyền năng lượng từ động cơ đến các bánh xe, từ đó giúp xe chuyển động. Vai trò của hệ thống truyền động không chỉ đơn giản là truyền lực, mà còn liên quan đến sự ổn định, hiệu suất và an toàn khi vận hành [1].

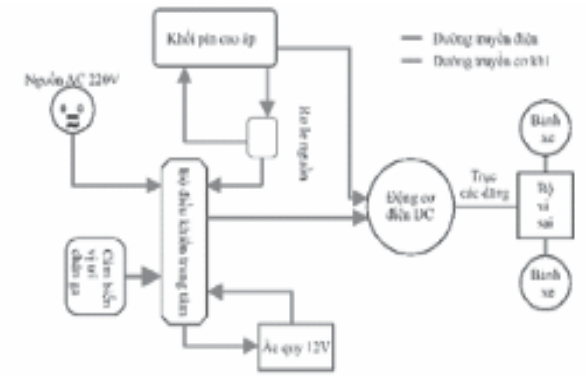
Hạn chế lớn nhất của ô tô điện là giới hạn về quãng đường di chuyển. Vì vậy, bằng cách nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng của ô tô điện như tối ưu hóa quản lý năng lượng, phanh tái tạo và các thông số vận hành khác trên ô tô điện [2].

Một phương pháp quan trọng để giảm suất tiêu thụ năng lượng là điều chỉnh hành vi người lái [3]. Bài báo tập trung nghiên cứu sự thay đổi tác động của bàn đạp ga đến tốc độ của xe thông qua thông số công suất và mô men của động cơ điện.

2. THIẾT KẾ HỆ THỐNG

2.1. Mô hình hệ thống truyền động lực trên ô tô điện

Mô hình được thể hiện như trên hình:



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống đường truyền trên xe

Trong mô hình này gồm 3 phần:

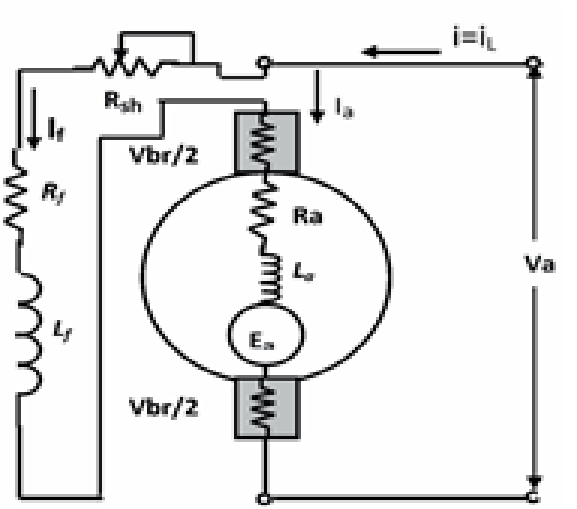
- Hệ thống truyền động lực: Động cơ điện, cầu chủ động, bánh xe;

- Cơ cấu điều khiển gồm: Bộ điều khiển, bàn đạp ga,…;

- Khối nguồn: Nguồn 220V, nguồn pin cao áp, nguồn ắc quy 12V.

2.2. Mô hình động cơ điện

Động cơ DC có khả năng điều khiển và điều chỉnh tốc độ với độ chính xác cao và theo từng mức tăng nhỏ. Ưu điểm của loại động cơ này là có thể thay đổi chiều quay bằng cách đảo cực điện áp đầu vào. Động cơ này cũng có mô-men xoắn cao, tỷ lệ thuận với bình phương dòng điện tải. Hình 2 minh họa sơ đồ mạch điện của động cơ DC nối tiếp [4].



Hình 2. Sơ đồ cấu tạo mạch điện động cơ DC

Tính toán của động cơ điện DC:

Suất điện động ở trạng thái động:

$$E_a = K_a.Ø.\omega_m \quad (1)$$

Điện áp trạng thái động:

$$Ua = e + i_a(R_a + R) + (L_a + L_f).\frac{di}{dt} + U_b \quad (2)$$

Điện áp ở trạng thái ổn định:

$$E = U - (R_a + R_f).I_a - U_{br} \quad (3)$$

Công suất:

$$P_e = \omega_m \times T_{em} = R_a \times I_a \quad (4)$$

Mô-men xoắn:

$$T_a = b_1.\omega + j.\frac{d\omega m}{dt} \quad (5)$$

2.3. Mô hình pin

Công suất đầu ra của pin tính theo công thức:

$$P_a = P_{yc} + P_r \quad (6)$$

Trong đó:

$P_a = U \times I$ – Công suất pin cung cấp đầu ra;

$P_r = R_t \times I^2$ – Công suất tổn hao do điện trở trong của pin;

P_{yc} – Công suất động cơ yêu cầu;

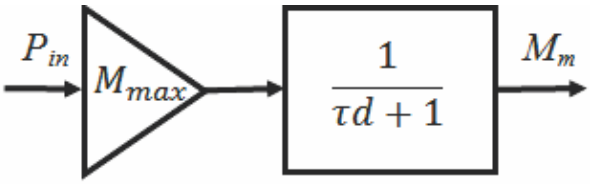
U – Hiệu điện thế giữa hai cực của pin;

R_t – Điện trở trong của pin.

2.4. Mối quan hệ động học giữa mô tơ và bàn đạp ga

Mô-men mô tơ M_{mt} được xác định theo các phương trình nêu trên. Trong nghiên cứu này sử dụng lý thuyết điều khiển tự động để xác định mô-men động cơ M_{mt} dựa vào tín hiệu ga $P_{in}(s)$ theo phương trình hàm truyền giữa mô-men xoắn và vị trí bàn đạp ga thể hiện như sau: [5, 6].

$$M_{mt}(s) = \frac{M_{max}}{(1 + \tau_d s)}.P_{in}(s) \quad (7)$$



Hình 3. Hàm truyền động cơ điện

Trong đó:

- τ_d: Độ trễ của mô tơ;
- M_{max}: Mô-men lớn nhất của động cơ điện;
- P_{in}: Tín hiệu bàn đạp;
- M_{mt}: Mô-men của động cơ điện.

3. THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ ĐỘNG HỌC CỦA Ô TÔ ĐIỆN

3.1. Kịch bản thử nghiệm

Các thử nghiệm được tiến hành cho xe chạy với các tốc độ khác nhau. Trong quá trình thử nghiệm có sử dụng phanh hãm nhằm tạo tải cho động cơ. Các kịch bản thử nghiệm được xây dựng dựa trên mối quan hệ động học và động lực học của xe điện, như trong bảng 1 dưới đây:

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

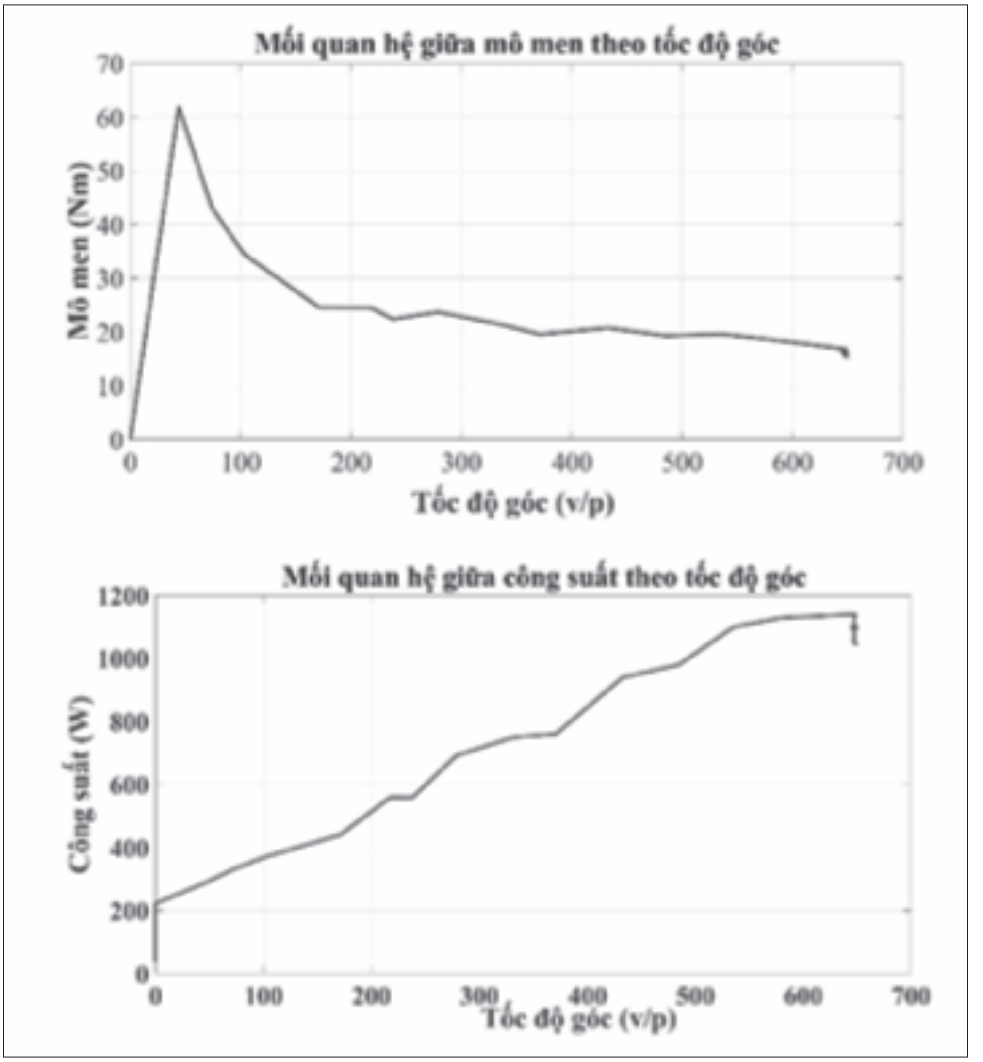
Bảng 1. Các kịch bản đo kiểm khảo nghiệm thông số

Phương án	Nội dung	Thông số vào	Thông số ra	Kết quả
A	Xác định mối quan hệ động học của xe theo vận tốc góc bánh xe	Tốc độ góc bánh xe (ω)	Mô-men	Đồ thị M = f(ω)
			Công suất	Đồ thị P = g(ω)
			Bàn đạp ga	Đồ thị VPA = h(ω)
B	Xác định đặc tính động lực học của xe	Bàn đạp ga	Mô-men	Đồ thị VPA = f(M)
			Công suất	Đồ thị VPA = f(P)
C	Xác định đặc tính tăng tốc của xe	Tốc độ góc bánh xe (ω)	Tốc độ xe	Đồ thị V = k(ω)
			Bàn đạp ga	Đồ thị VPA = m(ω)

3.2. Kết quả và thảo luận

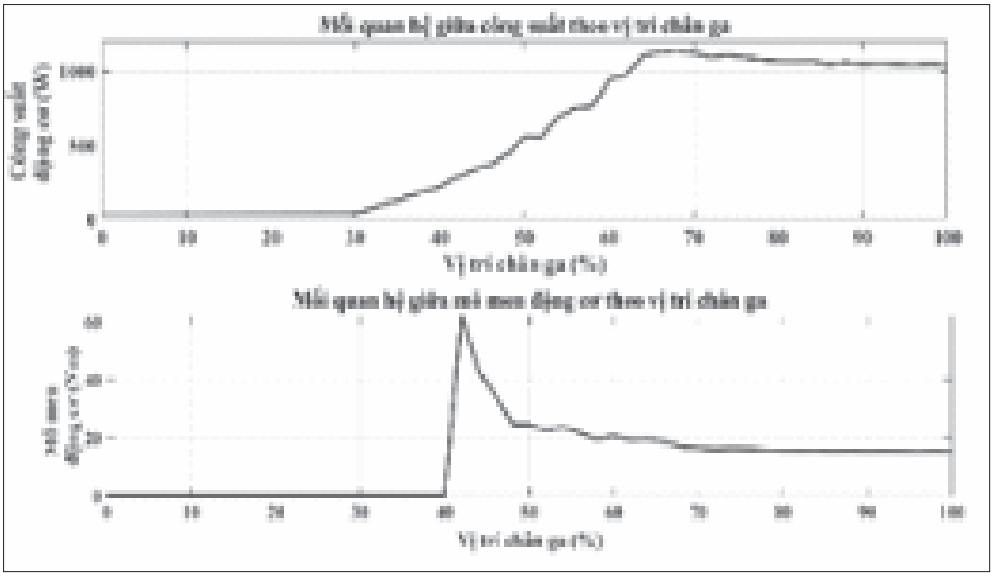
a) Quan hệ động học và động lực học theo tốc độ

Khi tốc độ bánh xe từ tốc độ 0 (v/p) và tăng tốc đến khi đạt được tốc độ ổn định và duy trì trong một khoảng thời gian. Thay đổi tốc độ quay được thực hiện bằng cách tăng độ mở bàn đạp ga từ 0 đến 100% nhằm thay đổi dòng điện cấp cho động cơ.



Hình 4. Đồ thị đặc tính động lực học

Giá trị mô-men hoạt động khi khởi động tương ứng độ mở chân ga ở 40% đạt giá trị lớn nhất 62N.m ở số vòng quay thấp, sau đó giảm dần và bằng giá trị định danh. Công suất động cơ tăng dần từ 0 đến 1150W và đạt giá trị cực đại tại số vòng quay 600 vòng/phút. Tốc độ quay tăng dần từ 0 đến 650 vòng/phút tương ứng với bàn đạp ga mở từ 40% đến 70%, các vị trí khác tốc độ không thay đổi.

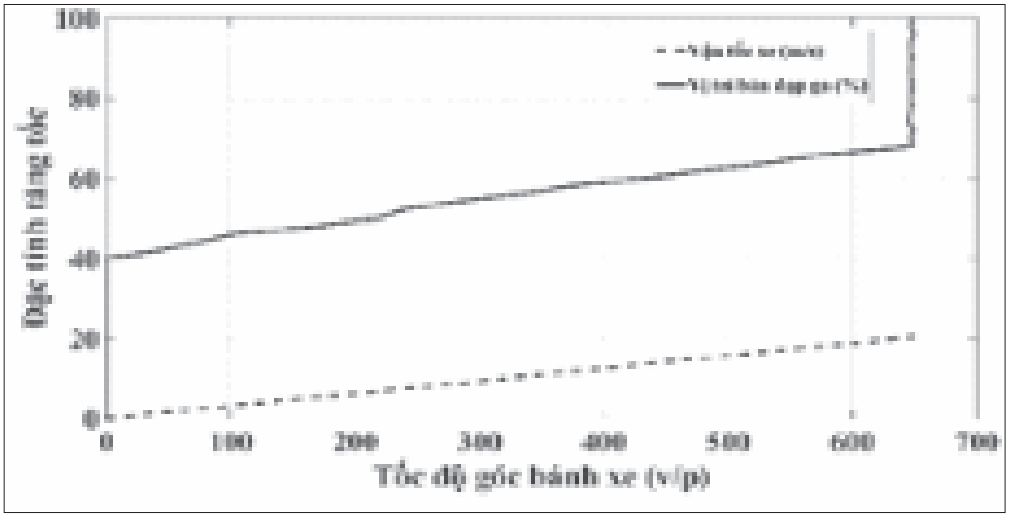


Hình 5. Đồ thị đặc tính động học

Đồ thị động học thể hiện mối tương quan giữa độ mở bàn đạp với công suất và mô-men của động cơ điện.

Từ đồ thị động lực học và động học cho thấy, mô-men đạt giá trị cực đại 62N.m ngay từ khi động cơ bắt đầu quay (ở số vòng quay thấp) giúp xe khởi hành dễ dàng và tăng tốc nhanh chóng. Công suất tăng từ 0 đến 650 (vòng/phút) ứng với độ mở chân ga từ 30% đến 70%, đảm bảo động cơ hoạt động trong dải rộng giúp xe đạt và duy trì tốc độ cao ổn định.

b) Đặc tính tăng tốc của xe



Hình 6. Đồ thị đặc tính tăng tốc

Tốc độ xe tăng dần từ vị trí chân ga 40% tốc độ tăng từ 0 đến 22 m/s, đạt giá trị cực đại vị trí chân ga 70%. Tại điểm này, mô-men xoắn cực đại được tạo ra ngay lập tức giúp xe tăng tốc nhanh chóng.

Từ các kết quả đo thực nghiệm cho thấy động cơ điện hoạt động trong vùng tối ưu với độ mở chân ga từ 40-70%. Giá trị mô-men cực đại tại số vòng quay thấp hơn so với công suất động cơ điện. Đặc tính động cơ điện DC đạt trạng thái ổn định với tốc độ quay không đổi qua các lần khảo nghiệm.

4. KẾT LUẬN

Kết quả bài báo cho thấy kết quả khảo nghiệm thực tế phù hợp với kết quả đã được nghiên cứu trước đây.

Động cơ điện DC phù hợp để sử dụng trong xe điện hay trong các hệ thống truyền động.

Các kết quả thu được nhằm phục vụ nghiên cứu đặc tính động cơ điện DC và thực nghiệm mô phỏng cho các nghiên cứu tiếp theo.❖

Ngày nhận bài: **16/5/2025**
Ngày phản biện: **03/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Vũ Đức Lập, "*Giáo trình cấu tạo ô tô*". NXB. Bách Khoa Hà Nội.
[2]. Gao; Kambiz Ebrahimi; Mehrdad Ehsani; Stefano Longo, "*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*". Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
[3]. Komorska, I.; Puchalski, A.; Niewczas, A.; Ślęzak, M.; Szczepański, T, "*Adaptive driving cycles of EVs for reducing energy consumption*". Energies 2021, 14, 2592.
[4]. Zeina Bitara, Samih Al Jabia*, Imad Khamisb, "*Modeling and Simulation of Series DC Motors in Electric Car*". Energy Procedia 50 (2014), 460-470.
[5]. Katsuhiko Ogata, "*Modern Control Engineering*". Prentice Hall, 2010.
[6]. Nguyễn Thị Phương Hà (2016), "*Lý thuyết điều khiển tự động*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.

SAI SỐ PHI TUYẾN CHU KỲ TRONG GIAO THOA KẾ HETERODYNE SỬA ĐỔI TRONG PHÉP ĐO DỊCH CHUYỂN NHỎ

PERIODIC NONLINEARITY IN A MODIFIED HETERODYNE INTERFEROMETER FOR SMALL DISPLACEMENT MEASUREMENTS

Nguyễn Thành Đông
Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội
Email: dong.nguyenthanh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Gia công siêu chính xác, công nghệ nano và bán dẫn có nhu cầu rất lớn với phép đo dịch chuyển nhỏ chính xác cao với độ phân giải nm và dưới nm. Bài báo trình bày phương pháp đánh giá sai số phi tuyến chu kỳ tồn tại trong giao thoa kế hai tần số heterodyne đo dịch chuyển nhỏ. Một hàm gán tuyến tính được sử dụng để so sánh kết quả đo. Một cấu hình Michelson sửa đổi với hai nhánh tách biệt được đề xuất để giảm sai số phi tuyến nhằm nâng cao độ chính xác. Kết quả đo cho biết sai số phi tuyến là ~20 nm trên vùng đo 2 μm (1 %). Thành phần phi tuyến λ/2 và λ/4 là 9.91 và 4.05 nm/Hz$^{1/2}$ tương ứng. Độ nhạy hệ đo đạt dưới mức 0.01 nm/Hz$^{1/2}$ trên 10 Hz.

Từ khóa: *Giao thoa kế heterdodyne; Đo dịch chuyển nhỏ; Độ nhạy đo; Hàm gán tuyến tính; Độ phi tuyến theo chu kỳ.*

ABSTRACT

Ultra-precision engineering, nanotechnology, and semiconductor applications require highly accurate displacement measurements with nanometer and sub-nanometer resolution. This paper evaluates periodic nonlinearity in heterodyne interferometers for nanometer-scale displacement measurements. A modified Michelson interferometer with spatially separated arms is proposed to reduce nonlinearity. A linear fitting method is used for error analysis. The results show a peak-to-peak nonlinearity of ~20 nm over a 2 μm range (1%), with λ/2 and λ/4 components of 9.91 and 4.05 nm/Hz$^{1/2}$, respectively. The system achieves a sensitivity below 0.01 nm/Hz$^{1/2}$ above 10 Hz.

Keywords: *Heterodyne interferometry; Displacement measurement; Measurement sensitivity; Linear fitting; Periodic nonlinearity.*

1. GIỚI THIỆU

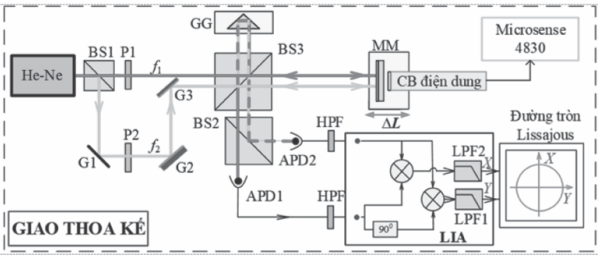
Giao thoa kế laser [1-3] là hệ thống đo quang học không tiếp xúc, có độ tin cậy và chính xác cao, dựa theo nguyên lý giao thoa để phát hiện dịch chuyển. Chúng rất phù hợp tới các phép đo dịch chuyển siêu nhỏ có độ phân giải nanomet hoặc dưới nanomet, nhờ khả năng đo tới định nghĩa chuẩn mét [4]. Do đó, giao thoa kế là công cụ quan trọng để đo dịch chuyển siêu nhỏ và ngày càng được tích hợp trong sản xuất công nghệ cao. Trong các giao thoa kế, giao thoa kế heterodyne hai tần số được lựa chọn trong nghiên cứu này nhờ hai ưu điểm chính: (1) Giao thoa kế heterodyne đo được dịch chuyển dưới nm, phạm vi đo rộng và chống nhiễu tốt [5]. (2) Hệ giao thoa này có cấu trúc gọn nhẹ, có thể tích hợp từ các máy CNC, CMM đến máy quang khắc [6] và kính hiển vi lực nguyên tử AFM [7].

Lỗi phi tuyến chu kỳ trong giao thoa kế chủ yếu do nguồn laser không lý tưởng và phân cực không hoàn hảo của các thành phần quang [8, 9]. Những sai lệch này gây ra tín hiệu pha tuần hoàn, làm giảm độ chính xác trong đo dịch chuyển ở cấp nanomet. Khi giả định đã loại bỏ sai số hình học (cosin, Abbe), lỗi phi tuyến chu kỳ trở thành nguồn sai số chính. Ngoài ra, ảnh hưởng môi trường được xem là không đáng kể nhờ vận tốc dịch chuyển cao (~vài μm/s) hoặc trong chân không.

Bài báo đề xuất một giao thoa kế Michelson sửa đổi nhằm tăng gấp đôi độ phân giải và giảm sai số phi tuyến chu kỳ xuống cấp nanomet. Thuật toán khuếch đại khóa tần (LIA) được sử dụng để phát hiện dịch chuyển nhỏ, kết hợp với hàm fitting để khớp kết quả tuyến tính. Sai số được đánh giá trên cả miền thời gian và tần số để xác định thành phần lỗi phi tuyến. Kết quả cho thấy hệ thống có thể đo dịch chuyển micromet với sai số phi tuyến chỉ vài nanomet.

2. GIAO THOA KẾ HAI TẦN SỐ SỬA ĐỔI VÀ PHÂN TÍCH SAI SỐ PHI TUYẾN CHU KỲ

Hình 1 mô tả nguyên lý hoạt động của giao thoa kế hai tần số heterodyne đo dịch chuyển nhỏ. Nguồn sáng là đầu laser He-Ne có hai thành phần sóng ánh sáng với f_1 và f_2, và hiệu tần số $\Delta f = f_2 - f_1 \approx 2.7$ MHz với ($f_2 > f_1$). Hai thành phần này có phương phân cực vuông góc nhau.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý giao thoa hai tần số (heterodyne): BS - Bộ tách chùm; P - Tấm phân cực; G - Gương; GG - Gương góc; MM - Gương dịch chuyển; APD - Cảm biến; HPF - Bộ lọc thông cao; LPF - Bộ lọc thông thấp.

Tia laser từ nguồn được chia làm hai nhánh bởi bộ tách chùm BS1. Nhánh thứ nhất cho phép thành phần f_1 qua nhờ xoay tấm phân cực P1 theo phương phân cực dọc (giả sử tia f_1 phân cực dọc); nhánh thứ hai phản xạ qua gương G1 cho phép thành phần f_2 qua nhờ xoay tấm phân cực P2 theo phương phân cực ngang (f_2 phân cực ngang). Hai chùm sáng sau đó phản xạ qua G2 và G3 để đi vào giao thoa kế.Trong giao thoa kế, tia f_1 đến BS3 được chia thành hai nhánh: một đi tới gương cố định GG, một đến gương di chuyển MM, sau đó đều phản xạ về BS2. Tia f_2 cũng được tách tương tự. Tại BS3, hai vị trí giao thoa độc lập được tạo ra và thu nhận nhờ hai cảm biến quang APD1 và APD2. Qua các bộ lọc thông cao (HPF), các tín hiệu $I_1(t)$ và $I_2(t)$ lần lượt là [9]:

$$I_1(t) = A\cos(\Delta\omega t - \omega_2\tau), \quad (1)$$

$$I_2(t) = B\cos(\Delta\omega t + \omega_1\tau), \quad (2)$$

Trong đó DC, τ, A, Δω (= $\omega_2 - \omega_1$) lần lượt là thành phần DC (offset), thời gian trễ do MM di chuyển quãng đường ΔL, biên độ tín hiệu, tần số góc chập do giao thoa của hai tia f_1 và f_2. Ở đây, thời gian trễ là:

$$\tau = \frac{2n\Delta L}{c}, \quad (3)$$

Trong đó, n và c lần lượt là chiết suất và vận tốc ánh sáng trong chân không. $I_1(t)$ và $I_2(t)$ được gửi đến máy đo pha LIA. $I_2(t)$ được tạo thêm thành phần vuông pha: $I_2'(t) = B\sin(\Delta\omega t + \omega_1\tau)$ nhờ hàm Hilbert (dịch pha 90 độ). Nhân $I_1(t)$ với cả $I_2(t)$ và $I'_2(t)$ được các tích. Các tích qua các bộ lọc thông thấp (LPF). Tín hiệu ra là:

$$X = \frac{AB}{2}\cos\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right), \quad (5)$$

$$Y = \frac{AB}{2}\sin\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right). \quad (6)$$

Đường tròn Lissajous và thuật toán $\tan^{-1}$ (Y/X) sẽ được thực hiện trong PC ở tốc độ 1 kS/s để tìm ΔΦ.

$$\Delta\Phi = \tan^{-1}\left[\frac{\sin\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right)}{\cos\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right)}\right] = (\omega_1 + \omega_2)\tau. \quad (7)$$

Thế (3) vào (7) sẽ được ΔΦ:

$$\Delta\Phi = (\omega_1 + \omega_2)\frac{2n\Delta L}{c} = \frac{8\pi n\Delta L}{\lambda}. \quad (8)$$

Ở đây đặt $\omega_1 + \omega_2 = 2\omega_0$ có ω_0 là tần số góc trung tâm, trong đó λ (≈ 633 nm) là bước sóng trung tâm của ánh sáng từ nguồn He – Ne trong chân không.

Trong thực tế, tia f_1 và f_2 không phân cực hoàn toàn và các chi tiết quang không thể tách f_1 và f_2 riêng biệt trong không gian, dẫn đến các tia phân cực bị lẫn với nhau. Lỗi phi tuyến chu kỳ sẽ tồn tại trong phép đo dịch chuyển và có mặt trong tín hiệu giao thoa. Hai tín hiệu $I_1(t)$ và $I_2(t)$ với lỗi phi tuyến được mô tả [10]:

$$I_1(t) = A\cos\left(\Delta\omega t - \omega_2\tau\right) + a\cos\left(\Delta\omega t - \xi\right),$$
$$I_2(t) = B\cos\left(\Delta\omega t + \omega_1\tau\right), \quad (9)$$

Trong đó, a và ξ lần lượt là biên độ và độ lệch pha giữa hai tín hiệu do lỗi chu kỳ phi tuyến sinh ra. Khi đó, tín hiệu ra của các LPF được viết lại là:

$$X = \frac{AB}{2}\cos\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right) + \frac{aB}{2}\cos\left(\omega_1\tau + \xi\right), \quad (10)$$

$$Y = \frac{AB}{2}\sin\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right) + \frac{aB}{2}\sin\left(\omega_1\tau + \xi\right). \quad (11)$$

Nhờ thuật toán tính $\tan^{-1}$ (Y/X), pha $\Delta\Phi_1$ được tính:

$$\Delta\Phi_1 = \tan^{-1}\left[\frac{\frac{AB}{2}\sin\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right) + \frac{aB}{2}\cos\left(\omega_1\tau + \xi\right)}{\frac{AB}{2}\cos\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right) + \frac{aB}{2}\sin\left(\omega_1\tau + \xi\right)}\right]. \quad (12)$$

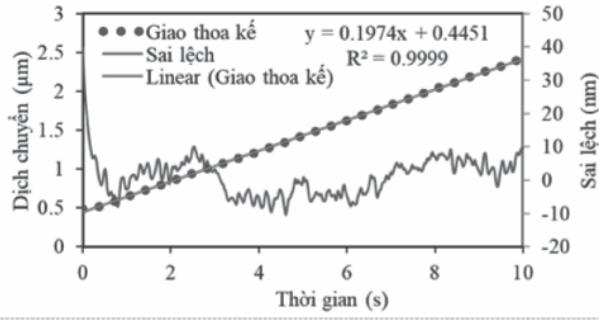
Lỗi pha α có thể được tính:

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{\frac{AB}{2}\sin\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right) + \frac{aB}{2}\cos\left(\omega_1\tau + \xi\right)}{\frac{AB}{2}\cos\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right) + \frac{aB}{2}\sin\left(\omega_1\tau + \xi\right)}\right]$$
$$- \tan^{-1}\left[\frac{\frac{AB}{2}\sin\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right)}{\frac{AB}{2}\cos\left((\omega_1 + \omega_2)\tau\right)}\right] \quad (13)$$

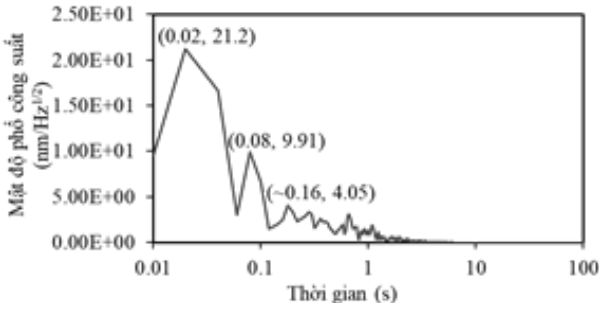
$$\alpha = \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_0.$$

Ở đây, $\Delta\Phi_0$ và $\Delta\Phi_1$ là giá trị lý tưởng và giá trị thực với lỗi phi tuyến chu kỳ.

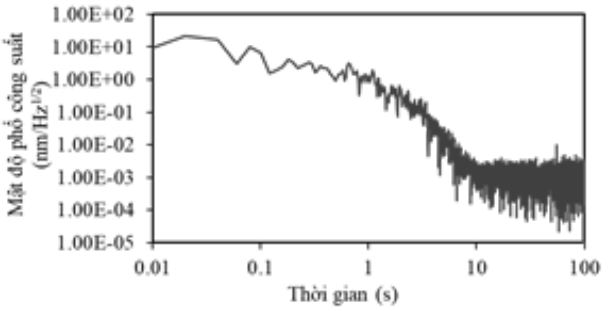
3. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ ĐO



(a)



(b)



(c)

Hình 2. Kết quả đo của giao thoa kế: (a) Dịch chuyển 2 µm ở tần số lặp 0.05 Hz và sai lệch so với hàm gán tuyến tính, (b) và (c) mật độ công suất phổ của sai lệch từ (a) với các trục đồ thị tuyến tính và logarit tương ứng.

Trong thực nghiệm, một đầu laze He-Ne (Agilent 5517C) được sử dụng như nguồn sáng. Gương MM gắn trên bàn dịch chuyển áp điện PZT (Chuo Precision Industrial). Bàn PZT được cấp với các tín hiệu sóng tam giác ở tần số lặp 0.05 Hz với biên độ 2 V từ một máy phát sóng để tạo chuyển động tuyến tính. Biên độ dịch chuyển là 2 µm với độ nhạy 1 µm/1 V. Một cảm biến điện dung với bộ điều khiển (Microsense 4830) được sử dụng để tham chiếu. Hai tín hiệu giao thoa được gửi tới LIA (NF Corporation, LI-5660). Kết quả được xử lý trên máy tính.

Hình 2 là kết quả đo của giao thoa kế. Một hàm gán với phương trình y = 0.1974x + 0.4451 được sử dụng để khớp kết quả đo. Sai lệch của kết quả đo so với hàm gán có biên độ ~20 nm và sai lệch chuẩn ~5.6 nm có trong hình 4(a). Sai lệch được phân tích bởi biến đổi nhanh Fourier (FFT) cho thấy một độ phổ công suất trên miền tần số [0.01 Hz, 100 Hz]. Từ hình 4(b), các đỉnh ở các tần số 0.02 Hz và 0.08 Hz được tìm thấy có biên độ lần lượt là 9.91 và 21.2 nm/Hz$^{1/2}$. Mức nhiễu nền dưới 10 nm/Hz$^{1/2}$ ở trên tần số 0.1 Hz và giảm xuống có thể đạt dưới mức 0.01 nm/Hz$^{1/2}$ trên 10 Hz. Điều này cho thấy các nhiễu tần số 10 Hz và cao hơn ít ảnh hưởng hệ đo. Tuy nhiên, các tần số dưới 1 Hz ảnh hưởng đến mức nm/Hz$^{1/2}$. Các sai số phi tuyến chu kỳ đã được tìm thấy, có thể kể đến tại 0.02 Hz và 0.08 Hz. Với các sai số phi tuyến chu kỳ liên quan đến sự phân cực ánh sáng không đúng là các thành phần λ/2 và λ/4. Với dịch chuyển 2 µm theo một hướng ở tần số 0.05 Hz, các thành phần λ/2 và λ/4 được xác định ở tần số ~0.16 Hz và ~0.08 Hz tương ứng. Từ hình 4(b), các thành phần λ/2 và λ/4 là 9.91 và 4.05 nm/Hz$^{1/2}$ tương ứng. Các thành phần 0.02 Hz và khác cũng góp phần tạo nên lỗi phi tuyến chu kỳ của kết quả đo. Đây có thể do sai số trễ (hysteresis) của bàn PZT.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một giao thoa kế Michelson với cấu hình sửa đổi để nâng cao độ phân giải được đề xuất. Các tia sáng phân cực vuông góc được tách theo hai nhánh riêng trong không gian để tránh xảy ra hiện tượng lẫn gây ra lỗi phi tuyến theo chu kỳ. Phương pháp hàm gán tuyến tính đánh giá phép đo dịch chuyển của giao thoa kế. Kết quả đo cho thấy các thành phần lỗi λ/4 và λ/2 được tìm thấy tuy nhiên giá trị chỉ vài nm/$Hz^{1/2}$ trên vùng 2 μm. Các sai số phi tuyến lẫn do chuyển động cũng được tìm thấy. Độ chính xác phép đo giao thoa kế được cải thiện. Nhờ tùy biến cấu hình phù hợp để giảm sai số phi tuyến, giao thoa kế heterodyne phù hợp cho các ứng dụng cần kiểm tra độ dịch chuyển nhỏ tới nanomet với độ chính xác cao trong tương lai.

Kinh phí (Funding):

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) dưới đề tài mã số T2024-PC-029.❖

Ngày nhận bài: **02/4/2025**
Ngày phản biện: **21/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. J. Lawall and E. Kessler (2000), "*Michelson interferometer with 10 pm accuracy*". Rev. Sci. Instrum. 71, 2669-2676.

[2]. Sun, Y.; Li, W.; Xing, X.; Wang, J.; Hu, P.; Tan, J. (2024), "*A Picometre-Level Resolution Test Method without Nonlinearity for Heterodyne Interferometer Measurement Electronics*". Photonics 2024, 11, 331.

[3]. F. Chen, W. Dong, M. Yang, L. Sun, and Z. Du (2019), "*A PZT actuated 6-DOF positioning system for space optics alignment*". IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics 24, 2827-2838.

[4]. "*The international system of units (SI)*". International Bureau of Weights and Measures (BIPM) (2019), https://www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf (accessed 15 August 2020).

[5]. Wang, X. Guo, Y. Wang, C. Jiang, J. Jiang, and Z. Zhang (2020), "*All-fiber differential interferometer for nanometric displacement measurement*". Optical Communications 475, 126283.

[6]. Junhao Zhu, Shengtong Wang, Xinghui Li, "*Ultraprecision Grating Positioning Technology for Wafer Stage of Lithography Machine*" [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922019.

[7]. Ahlawat, V., Deopa, S. P. S., & Patil, S. (2022), "*Quantitative Elasticity of Flexible Polymer Chains Using Interferometer-Based AFM*". Nanomaterials, 12(3).

[8]. Qian, Y., Li, J., Feng, Q., He, Q., & Long, F. (2023), "*Error Analysis of Heterodyne Interferometry Based on One Single-Mode Polarization-Maintaining Fiber*". Sensors, 23(8), 4108.

[9]. Badami, V. G., & Patterson, S. R. (2000), "*A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry*". Precision Engineering, 24(1), 41-49.

[10]. Nguyễn Thành Đông (2024), "*Giao thoa kế heterodyne sửa đổi với hai tần số tách biệt trong không gian cho phép đo dịch chuyển nhỏ*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 316(35), tr. 215-219.

HIỆU CHỈNH PHÉP ĐO PHA VÀ DỊCH CHUYỂN TRONG GIAO THOA KẾ HOMODYNE ĐIỀU BIẾN TẦN SỐ

PHASE AND DISPLACEMENT CORRECTION IN FREQUENCY-MODULATED HOMODYNE INTERFEROMETRY

Nguyễn Thành Đông
Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội
Email: dong.nguyenthanh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương pháp tính pha hiệu chỉnh trong hàm $\tan^{-1}$, dựa trên thuật toán khuếch đại khóa tần (LIA) của giao thoa kế homodyne có điều biến tần số, nhằm đo dịch chuyển với độ chính xác nanomet. Pha chưa hiệu chỉnh bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi của tỉ số các hàm Bessel do sự thay đổi của chỉ số điều biến m theo dịch chuyển gương. Phương pháp mới loại bỏ tỉ số Bessel trong $\tan^{-1}$, giúp tính pha chính xác hơn. So với cách tính trước, pha hiệu chỉnh cho sai số nhỏ hơn đáng kể và hỗ trợ đo lường chính xác với độ phân giải dưới 1 nm.

Từ khóa: *Giao thoa kế homodyne điều biến tần số; Đo dịch chuyển nhỏ; Khuếch đại khóa tần; Pha tính hiệu chỉnh trong hàm $\tan^{-1}$.*

ABSTRACT

The paper proposes a phase correction method in the $\tan^{-1}$ function, based on the lock-in amplifier (LIA) algorithm in a frequency-modulated homodyne interferometer, for nanometer-precision displacement measurement. The variation of the Bessel function ratio caused by the change in the modulation index m as the mirror moves affects the uncorrected phase. The proposed method eliminates the Bessel function ratio in the $\tan^{-1}$ calculation, enabling more accurate phase estimation. Compared to the previous approach, the corrected phase yields significantly lower error and supports sub-nanometer-level high-precision measurements.

Keywords: *Frequency-modulated homodyne interferometer; Small displacement measurement; Lock-in amplifier; Uncorrected phase in the $\tan^{-1}$ function.*

1. GIỚI THIỆU

Giao thoa kế một tần số homodyne với kỹ thuật điều biến tần số/pha được sử dụng rộng rãi trong các hệ đo giao thoa dịch chuyển nhỏ nhờ độ nhạy cao, dải đo rộng và độ tuyến tính tốt [1, 2]. Kỹ thuật điều biến tần số sóng sin là một ứng dụng điển hình trong kỹ thuật phát và thu thông tin trong giao thoa kế. Hệ thống giao thoa này đã phát triển mạnh mẽ trong các lĩnh vực đo độ dịch chuyển, rung động, địa hình bề mặt,... nhờ cấu hình đơn giản, độ chính xác cao và khả năng miễn nhiễu tốt đối với các nhiễu quang học cũng như điện tử [3, 4].

Trong kỹ thuật điều biến tần số với giao thoa kế homodyne đo dịch chuyển, kỹ thuật khuếch đại khóa tần LIA dùng để tạo cặp tín hiệu hài chẵn và lẻ từ tín hiệu giao thoa I. Biểu đồ Lissajous từ cặp tín hiệu hài này sẽ xác định sự thay đổi pha trong I do dịch chuyển gương đo. Trong nghiên cứu trước, pha trong $\tan^{-1}$của cặp tín hiệu hài không chính xác do coi tỉ số cặp hàm Bessel trong $\tan^{-1}$ là hằng số với chỉ số điều biến m cố định [5, 6]. Thực tế m thay đổi theo dịch chuyển gương nên tỉ số cặp hàm Bessel thay đổi. Tan^{-1} của pha đúng khi tỉ số Bessel tiến tới 1. Tan^{-1} sẽ không chính xác và có lỗi khi tỉ số cặp hàm Bessel ra xa 1. Điều này giới hạn phép đo dịch chuyển chính xác ở khoảng cách đo đặc biệt.

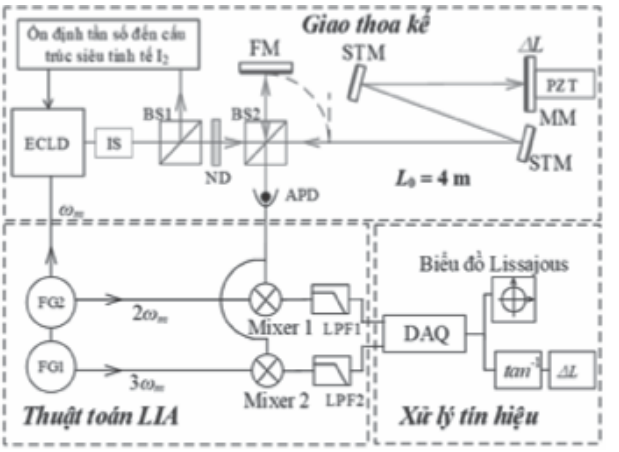
Trong bài báo này, phép tính pha do hàm $\tan^{-1}$ được hiệu chỉnh bằng kỹ thuật loại bỏ tỉ số cặp hàm Bessel. Phương pháp này có thể tính đúng mà không bị phụ thuộc vào tỉ số cặp hàm Bessel tiến tới 1 hay không. Cách tính này mở rộng hệ đo với các khoảng cách đo tùy ý mà không phụ thuộc vào m và nâng cao độ chính xác phép đo. Kết quả mô phỏng cho thấy pha tính hiệu chỉnh có sai số 10^{-8} rad trên vùng đo 125 rad, tương ứng sai số tương đối 10^{-11} trong điều kiện lý tưởng. Trong tương lai, kỹ thuật tính pha hiệu chỉnh sẽ được kiểm tra trên hệ quang thực để nâng cao độ chính xác trong phép đo dịch chuyển nhỏ tới 1 nm.

2. HIỆU CHỈNH ĐO PHA VÀ DỊCH CHUYỂN TRONG GIAO THOA KẾ HOMODYNE ĐIỀU BIẾN TẦN SỐ

Hình 1 mô tả nguyên lý hệ đo. Một nguồn laze đi-ốt khoang cộng hưởng ngoài ECLD được dùng nguồn sáng với tần số được ổn định theo cấu trúc siêu tinh của I_2. Tần số ánh sáng từ ECLD được điều biến nhờ điều biến dòng bơm của đầu laze theo dạng sóng sin. Tần số góc của ELCD được biểu diễn:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_m \sin(\omega_m t) \qquad (1)$$

Trong đó, ω_0 (= $2\pi f_0$), ω_m và $\Delta\omega_m$ (= $2\pi\Delta f_m$) là tần số góc ban đầu của ELCD, tần số góc và biên độ điều biến tương ứng. Ánh sáng sau khi đi qua lọc sáng ND sẽ tách thành hai nhánh nhờ bộ tách chùm BS2, một tới gương cố định FM và một tới gương đo MM. Sau đó, cả hai quay lại gặp nhau tại BS2 tạo ra giao thoa.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý giao thoa một tần số (homodyne) và kỹ thuật điều biến tần số đo dịch chuyển: ECLD - Laze đi-ốt khoang cộng hưởng ngoài; IS - Tấm cách ly; BS - Bộ tách sóng; STM - Gương bán thấu; FM và MM - Gương cố định và gương đo tương ứng; ND - Tấm giảm cường độ; APD - Cảm biến.

Cảm biến quang APD chuyển ánh sáng giao thoa ra tín hiệu điện và tới bộ xử lý tín hiệu dựa trên nguyên lý khuếch đại khóa tần (LIA). I được biểu diễn:

$$I = DC + 2A\cos\left(m\sin\omega_m t + \Phi\right), \quad (3)$$

Trong đó, DC, 2A và Φ lần lượt là thành phần một chiều, biên độ và tổng pha.

Pha Φ được tính:

$$\Phi = \frac{4\pi n_{air}}{\lambda} L = \frac{4\pi n_{air}}{\lambda}\left(L_0 + \Delta L\right), \quad (4)$$

Trong đó: L, L_0, ΔL, λ, và n_{air} lần lượt là độ lệch khoảng cách đi giữa hai nhánh, độ dài không cân bằng, độ dịch chuyển của gương đo MM, bước sóng ánh sáng trong chân không và chiết suất của không khí. Khai triển theo hàm Bessel và sử dụng kỹ thuật điều chế khuếch đại khóa tần LIA, hài bậc hai ($x(2\omega_m)$) và bậc ba ($y(2\omega_m)$) suy từ tín hiệu I là:

$$\begin{aligned} x(2\omega_m) &= A\cos(\Phi)J_2(m), \\ y(3\omega_m) &= -A\sin(\Phi)J_3(m), \end{aligned} \quad (5)$$

Pha Φ được tính nhờ hàm $\tan^{-1}$ như sau:

$$\Phi = \tan^{-1}\left(-\frac{y(3\omega_m)}{x(2\omega_m)} \times \frac{J_2(m)}{J_3(m)}\right). \quad (6)$$

Tuy nhiên, hệ số điều biến m được tính như sau:

$$m = \frac{4\pi\Delta f_m n_{air}\left(L_0 + \Delta L\right)}{c}, \quad (7)$$

Trong đó, c là vận tốc ánh sáng ở chân không.

Từ (6) và (7), $J_2(m)/J_3(m)$ thay đổi theo ΔL nên Φ trong (6) không tính được. Thực tế, Φ_e chỉ được tính gần đúng trong (6) khi J_2/J_3 không đổi với $m_0 \approx 4\pi\Delta f_m n_{air} L_0/c$ cố định. Do đó tính pha hiệu chỉnh Φ_c nhờ khử J_2/J_3. Vi phân x và y:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x &= -A\sin(\Phi)J_2(m)\frac{d}{dt}\Phi, \\ \frac{d}{dt}y &= -A\cos(\Phi)J_3(m)\frac{d}{dt}\Phi. \end{aligned} \quad (8)$$

Tính thương Q của các tích:

$$Q = \frac{x\frac{d}{dt}x}{y\frac{d}{dt}y} = -\left(\frac{J_2(m)}{J_3(m)}\right)^2 = -\left(\frac{J_2}{J_3}\right)^2 \quad (9)$$

Pha hiệu chỉnh Φ_c được tính:

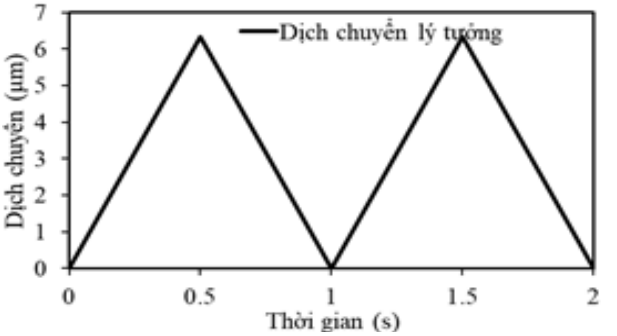
$$\Phi_c = \tan^{-1}\left(-\frac{y(3\omega_m)}{x(2\omega_m)} \times \left(\sqrt{-Q}\right)\right). \quad (10)$$

Sai số ΔΦ là:

$$\Delta\Phi = \tan^{-1}\left(-\frac{y(3\omega_m)}{x(2\omega_m)} \times \frac{J_2}{J_3}\right) - \Phi_c, \quad (11)$$

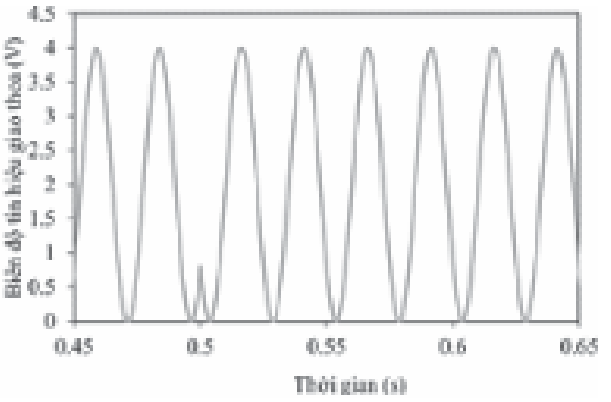
Trong đó, J_2/J_3 là hằng số.

3. THỰC NGHIỆM MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ



(a)

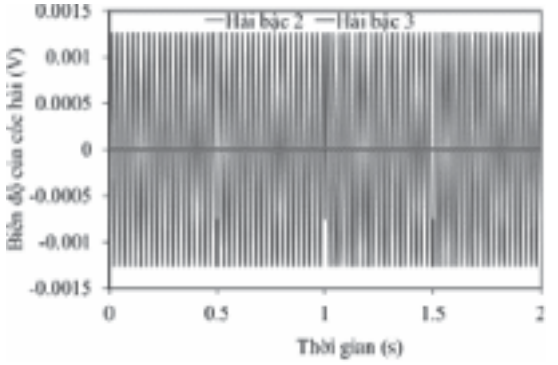
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



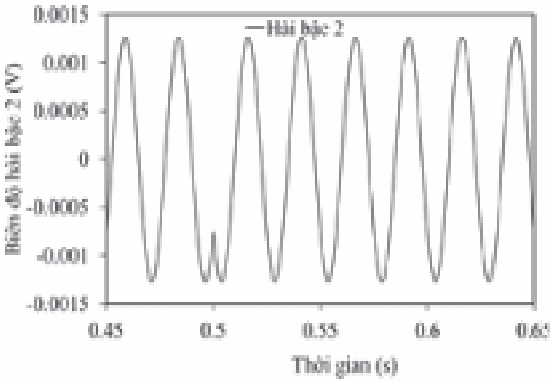
(b)

Hình 2. Dịch chuyển và tín hiệu giao thoa I lý tưởng trong mô phỏng

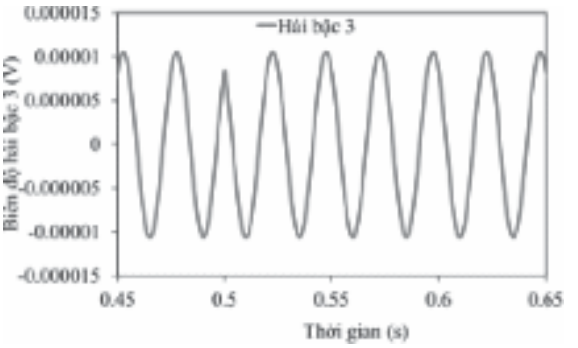
Các thông tin đầu vào sẽ được mô phỏng số. Gương MM được dịch chuyển theo sóng tam giác trong 2 s với tần số 1 Hz và biên độ 6.33 μm. Pha được biến đổi theo (4). Các thông tin có ở bảng 1.



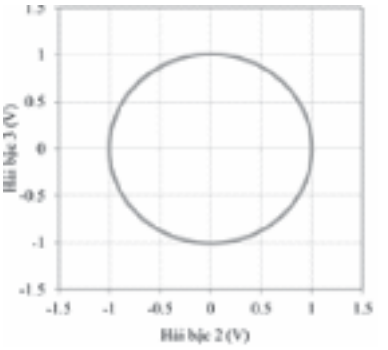
(a)



(b)



(c)



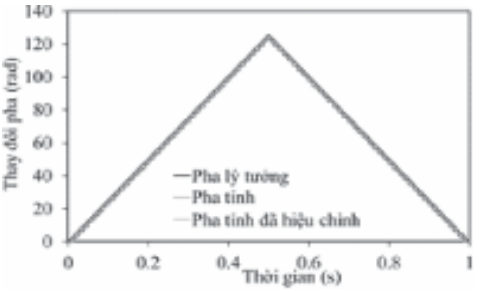
(d)

Hình 3. Các tín hiệu hài mô phỏng từ phương trình (5): (a) Biên độ các hài, (b) và (c) hài bậc 2 và 3 từ giây 0.45 đến 0.65 trong (a) và (d) đường tròn Lissajous

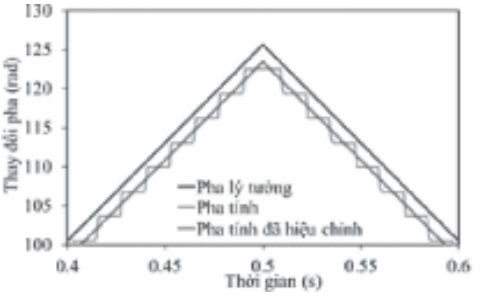
Bảng 1. Các thông số đầu vào của giao thoa kế được giả lập

Dịch chuyển sóng tam giác ΔL	ΔL = 6.33 μm Tần số sóng 1 Hz	Thành phần một chiều DC	DC = 2 V
Thời gian t	t = 0 - 2 s, dt = 1 ms	Biên độ A	A = 1 V
Khoảng cách L_0	L_0 = 4 m	Điều biến m_0	$m_0 \approx$ 0.0503
Chiết suất n_{air}	n_{air} = 1	Bước sóng λ	λ = 633 nm
Tần số điều biến f_m	f_m = 300 kHz	Vận tốc ánh sáng	$c = 10^8$ m/s

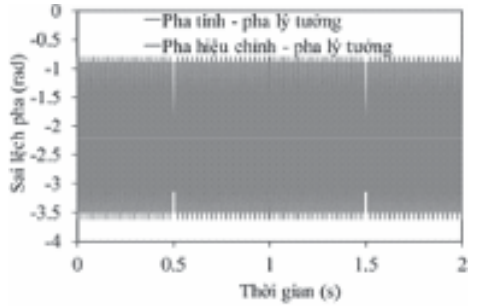
Dịch chuyển và tín hiệu giao thoa I lý tưởng với các thông số trong bảng 1 được mô tả trong hình 2. Dùng thuật toán LIA, các thành phần hài bậc hai $x(2\omega_m)$ và hài bậc ba $x(3\omega_m)$ được tạo ra. Hình 3 biểu diễn các tín hiệu hài mô phỏng bằng phương trình (5). Biên độ hài bậc 3 nhỏ hơn rất nhiều so với biên độ hài bậc 2 do tỉ số $J_3(m_0)/J_2(m_0) \approx 0.0084$ rất bé, tiến gần tới 0 (hình 3(b)). Đường tròn Lissajous gần như hoàn hảo trong hình 3(d). Các pha gồm pha lý tưởng Φ_0 trong (4), pha tính Φ_e trong (6) với $J_3/J_2 \approx 0.0084$ và $m_0 = 0.0503$ và pha tính đã hiệu chỉnh Φ_c trong (10) sẽ được so sánh với nhau trong thời gian t = 0 - 2 s, dt = 1 ms.



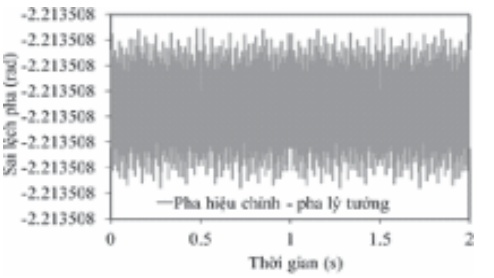
(a)



(b)



(c)



(d)

Hình 4. So sánh các pha từ kết quả mô phỏng: (a) và (b) Φ_0, Φ_e và Φ_c trong 2 s và từ giây 0.4 đến 0.6, (c) và (d) sự lệch pha Φ_0 và Φ_e và giữa Φ_0 và Φ_c.

Hình 4 biểu diễn so sánh các pha từ kết quả mô phỏng. Các pha Φ_0 trong (4), Φ_e trong (6) và Φ_c trong (10) được so sánh với nhau. Lỗi dịch bậc (step-shift error) của thay đổi pha trong Φ_e được tìm thấy khi J_3/J_2 tiến tới 0 (hình 4(a) và (b)). Sự sai lệch pha giữa Φ_0 và Φ_e và giữa Φ_0 và Φ_c được thấy trong hình 4(c) và (d). Do lỗi dịch bậc nên sự sai lệch giữa Φ_0 và Φ_e là lớn (trên 4.5 rad), ngược lại sai lệch trong mô phỏng lý tưởng là khoảng 10^{-8} rad trên vùng thay đổi pha $\Phi_0 = 125$ rad.

Mở rộng thí nghiệm, lặp lại các bước đánh giá với các $m_0 < 0.2$, m_0 quanh 6.38, 9.76, 13.01,... làm J_3/J_2 tiến tới 0, lỗi dịch bậc trong (6) cho thấy rõ ràng nhất. Cách tính cũ trong (6) tìm Φ_e và dịch chuyển ΔL của gương MM trong giao thoa kế homodyne với điều biến tần số là không chính xác. Ngược lại với m_0 = 3.7689, 5.1356, 7.4146, ... thì $J_3/J_2 = 1$ và lỗi dịch bậc của trong (6) rất bé, gần bằng 0. Sai lệch gần pha giữa Φ_0 và Φ_e và giữa Φ_0 và Φ_c tương đương với nhau. Cách tính cũ trong (6) là chính xác. Do vậy, cách tính từ phương trình (6) bị hạn chế độ chính xác theo m, điều này làm giảm khả năng mở rộng các phép đo khoảng cách tùy biến. Các nghiên cứu trước [4-6] chỉ tính Φ_e với $J_3/J_2 \approx 1$, khi đó Φ_e tiến tới Φ_0 và công thức (6) đúng nên không có lỗi dịch bậc này.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

4. KẾT LUẬN

Bài báo này chứng minh lỗi dịch bậc trong kỹ thuật xác định pha bằng thuật toán LIA trên hệ giao thoa homodyne có điều biến tần số. Lỗi xuất phát từ việc sử dụng hàm $\tan^{-1}$ giữa cặp tín hiệu hài bậc chẵn và lẻ, với giả định tỉ số các hàm Bessel không đổi. Tuy nhiên, khi chỉ số điều biến m thay đổi theo dịch chuyển gương, tỉ số này cũng thay đổi, gây sai lệch pha. Để khắc phục, bài báo đề xuất một phương pháp hiệu chỉnh pha mới, cho phép tính pha chính xác với mọi giá trị m, từ đó giúp hệ đo linh hoạt trong đo khoảng cách tùy biến mà không bị giới hạn bởi m. Phương pháp này mở rộng ứng dụng đo lường chính xác với độ phân giải dưới 1 nm và sẽ tiếp tục được nghiên cứu trong các hệ đo quang tương lai.

Kinh phí (Funding):

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) dưới đề tài mã số T2024-PC-029.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **23/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. S.-C. Huang, Y.-F. Huang, and F.-H. Hwang (2013), "*An improved sensitivity normalization technique of PGC demodulation with low minimum phase detection sensitivity using laser modulation to generate carrier signal*". Sensor Actuat A. 191, 1-10.

[2]. Vu, T.-T., Maeda, Y., & Aketagawa, M. (2016), "*Sinusoidal frequency modulation on laser diode for frequency stabilization and displacement measurement*". Measurement, 94, 927-933.

[3]. T. Suzuki, K. Kobayashi, and O. Sasaki (2000), "*Real-time displacement measurement with a two-wavelength sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer*". Appl. Opt. 39(16), 2646-2652.

[4]. T. Suzuki, T. Okada, O. Sasaki, and T. Maruyama (1997), "*Real-time vibration measurement using a feedback type of laser diode interferometer with an optical fiber*". Opt. Eng. 36(9), 2496-2502.

[5]. Hoang, A. T., Vu, T. T., Pham, D. Q., Vu, T. T., Nguyen, T. D., & Tran, V. H. (2023), "*High precision displacement measuring interferometer based on the active modulation index control method*". Measurement, 214(15), 1-6.

[6]. Guo, D., Wang, M. (2007), "*Self-mixing interferometry based on a double-modulation technique for absolute distance measurement*". Applied Optics, 46(9).

NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC TẾ VI LIÊN KẾT HÀN GIÁP MỐI THÉP A572-GRADE 50 CHO TRỤ ĐIỆN GIÓ TẠI VIỆT NAM BẰNG QUÁ TRÌNH HÀN GMAW

RESEARCH ON MICROSTRUCTURE OF BUTT WELD OF A572-GRADE 50 STEEL FOR WIND POWER IN VIETNAM BY THE GMAW WELDING PROCESS

Nguyễn Tiến Huy[1], Vũ Minh Hùng[1], Đỗ Thế Vinh[2]
[1]Trường Đại học Dầu khí Việt Nam
[2]Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên

TÓM TẮT

Trong những thập niên gần đây, nhu cầu phát triển các nguồn năng lượng tái tạo trên toàn thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng ngày càng lớn, đặc biệt là điện gió ngoài khơi tại Việt Nam đang tăng mạnh do sự phân bố về địa lý đặc biệt thuận lợi của các tỉnh với vùng biển kéo dài với nguồn năng lượng gió rất lớn. Hiện nay, việc thiết kế và chế tạo kết cấu chân đế cho tua-bin gió tại Việt Nam vẫn phụ thuộc chủ yếu vào các công nghệ của nước ngoài. Vì vậy, việc nghiên cứu thiết kế móng trụ điện gió bằng vật liệu thép A572 – Grade 50 (một loại thép có tính chất cơ học tốt và phù hợp với điều kiện biển) là rất cần thiết để các doanh nghiệp tham gia chế tạo các bộ phận, kết cấu các trụ điện gió có thể từng bước làm chủ công nghệ và tiến tới nội địa hóa trong việc chế tạo các thiết bị phục vụ cho ngành công nghiệp điện gió.

Từ khóa: *Quá trình hàn GMAW; Liên kết hàn giáp mối; Thép A572 – Grade 50; Dây hàn bù Q 71.1 RC.*

ABSTRACT

In recent decades, the demand for developing renewable energy sources worldwide, and in Vietnam in particular, has been growing significantly, especially offshore wind power in Vietnam, which is rapidly increasing due to the particularly favorable geographical distribution of coastal provinces with extensive sea areas and abundant wind energy resources. Currently, the design and fabrication of foundation structures for wind turbines in Vietnam still heavily rely on foreign technologies. Therefore, researching the design of wind turbine monopile foundations using A572 – Grade 50 steel (a type of steel with excellent mechanical properties and suitable for marine conditions) is crucial to enable businesses involved in manufacturing components and structures for wind turbines to gradually master the technology and move toward localizing the production of equipment for the wind power industry.

Keywords: *GMAW process; Butt-joint; A572 – Grade 50 Steel; Q71.1 RC welding wire.*

1. GIỚI THIỆU

Việt Nam là một đất nước có những lợi thế lớn so với rất nhiều nước trên toàn thế giới nói chung và trong khu vực nói riêng vì có bờ biển trải dài và dân cư đông đúc dọc theo chiều dài đất nước. Những khu vực bờ biển dài này có một lưu lượng gió với tốc độ cao và mực nước không quá sâu, lực lượng lao động lành nghề với năng lực sản xuất trẻ - mạnh mẽ trong lĩnh vực kinh tế biển. Những yếu tố tự nhiên và sự phân bố dân cư này là một tiềm năng và lợi thế đặc biệt lớn đối với việc phát triển năng lượng gió gần bờ và ngoài khơi. Việc phát triển điện gió nói chung và điện gió ngoài khơi nói riêng sẽ mang lại cho Việt Nam thêm một nguồn năng lượng sạch vô tận, có thể tạo ra nhiều việc làm cho người lao động quanh khu vực và giúp cắt giảm đáng kể lượng khí thải CO_2 ra ngoài môi trường, đảm bảo các yêu cầu của Quốc tế về công tác biến đổi khí hậu, yêu cầu của Bộ Khoa học và Công nghệ về việc giảm thiểu sự phát thải ra ngoài môi trường. Báo cáo [1] đã chỉ ra rằng, đến năm 2035, Việt Nam có tiềm năng phát triển điện gió ngoài khơi khoảng 600.000 MW với mức cung cấp đạt khoảng 12% tổng sản lượng tiêu thụ điện của cả nước sử dụng trong giai đoạn này. Với cam kết cùng cộng đồng quốc tế, Việt Nam sẽ giảm phát thải khí các-bô-níc trong khoảng 25 năm tới đây và theo dự thảo Quy hoạch điện VIII của Việt Nam, đến năm 2045, việc phát triển điện gió và điện ngoài khơi có khả năng sẽ chiếm một tỷ trọng lớn trong tổng nguồn phát điện trong cả nước [2]. Điều này cho thấy, dự án phát triển và khai thác điện gió và điện ngoài khơi không những là một bước ngoặt trong việc phát triển năng lượng sạch, góp phần vào việc chống biến đổi khí hậu trong khu vực nói riêng và thế giới nói chung mà còn là chiến lược khai thác tiềm năng to lớn về năng lượng, cũng như đảm bảo thực hiện tốt trong việc khai thác và phát triển nguồn kinh tế biển của Việt Nam [3]. Một trong những công việc đầu tiên cần được quan tâm khi chế tạo các kết cấu trụ điện gió là nâng cao độ bền các liên kết hàn trong điều kiện khí hậu biển Việt Nam là đặc biệt quan trọng nhằm đảm bảo sự an toàn và độ bền của kết cấu trong quá trình vận hành các trụ điện gió. Bài báo này nghiên cứu cấu trúc tế vi và độ bền kéo liên kết giáp mối thép A572 – Grade 50 khi hàn bằng quá trình hàn bán tự động trong môi trường khí bảo vệ với dây hàn lõi thuốc để đánh giá sự phù hợp trong việc ứng dụng chúng trong quá trình sản xuất trụ điện gió trên bờ và điện gió ngoài khơi tại Việt Nam.

2. VẬT LIỆU VÀ TRÌNH TỰ THỰC NGHIỆM

2.1. Kim loại cơ bản và dây hàn bù

Toàn bộ vật liệu cơ bản được sử dụng trong nghiên cứu này là thép A572 – Grade 50 (một loại thép được sử dụng phổ biến trong chế tạo các trụ điện gió và điện gió ngoài khơi tại các nước trên thế giới) với chiều dày là 10mm, quá trình hàn sử dụng dây hàn bù lõi thuốc Q71.1 RC (1C) với đường kính dây là 1.2mm. Đây là loại dây hàn lõi thuốc với lượng rutile cao giúp xỉ có thể kết tinh và nổi lên nhanh, có thể hỗ trợ cho việc hợp kim hóa kim loại mối hàn, dây hàn này có thể hàn được ở tất cả các vị trí hàn. Trong quá trình hàn, tác giả sử dụng khí bảo vệ là CO_2 với lưu lượng là 11 lít/ phút. Thành phần hóa học và đặc tính cơ học của kim loại cơ bản và kim loại dây hàn bù được tác giả trình bày tương ứng trong Bảng 1 và Bảng 2 [4-6].

☞

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép A572 – Grade 50 và dây hàn lõi thuốc BÖHLER Q 71.1 RC (C1) (wt. %)

Vật liệu	C	Si	Mn	S	P	Fe
Thép A572-Grade 50	0.23÷0.29	0.4	1.35	0.05	0.04	Còn lại
Q71.1 RC	0.004	0.64	1.129	2.035	16.316	Còn lại

Bảng 2. Độ bền kéo của thép A572 – Grade 50 và dây hàn lõi thuốc BÖHLER Q 71.1 RC (C1)

Vật liệu	Độ bền kéo (MPa)	Độ giãn dài tương đối (%)
Thép A572-Grade 50	499	18
Q71.1 RC	540	25

2.2. Trình tự thực hiện thí nghiệm

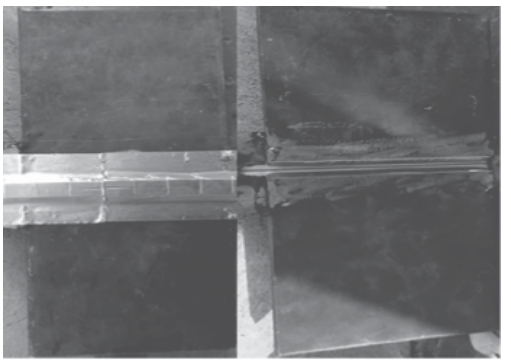
Tất cả các tấm thép hàn được sử dụng làm thực nghiệm trong nghiên cứu này được mua về ở dạng tấm lớn với chiều dày 10mm. Tất cả các phôi được sử dụng trong thực nghiệm đều được tác giả cắt vát chữ V bằng các thiết bị cắt plasma, sau đó chúng được để nguội ngoài môi trường một cách tự nhiên, kích thước cắt các phôi được cố định với chiều dài 200mm và chiều rộng là 150mm. Khi các phôi vừa cắt đạt đến trạng thái nguội, một máy mài tay được tác giả sử dụng để làm sạch toàn bộ lớp ô-xít trên bề mặt mép vát và bề mặt của tấm phôi, tiếp theo là mài mép cùn với chiều dày khoảng 1mm trên toàn bộ các tấm thép. Sau khi mài xong, các tấm phôi được đính chặt với nhau tại hai đầu với khe hở cố định là 2.5mm, sau đó một tấm sứ lót được dán phía đối diện để đảm bảo sự thuận lợi cho quá trình hình thành liên kết hàn, sứ lót chân mối hàn dạng rãnh dẹt với kích thước rãnh là 6 mm. Đây là loại sứ lót được sử dụng phổ biến trong ngành công nghiệp đóng tàu và các ngành công nghiệp có sử dụng công nghệ hàn dây lõi thuốc. Hình 1 mô tả dạng liên kết hàn khi hàn các liên kết giáp mối thép A572 – Grade 50 trong nghiên cứu này. Sau khi hoàn thành việc gá đính và chuẩn bị các mẫu hàn một cách cẩn thận, tác giả tiến hành hàn các mẫu theo trình tự các lớp hàn với chế độ hàn được cho trong Bảng 3. Sau khi hàn xong, các mẫu hàn sẽ được kiểm tra ngoại dạng để chọn ra các mẫu đảm bảo không bị các khuyết tật ngoại dạng. Sau khi lựa chọn các mẫu đảm bảo yêu cầu về ngoại dạng, các mẫu này sẽ được đưa đi cắt dây để lấy mẫu thử độ bền kéo và mẫu phân tích cấu trúc tế vi của liên kết hàn theo yêu cầu.

Bảng 3. Bảng thông số chế độ hàn

Đường kính dây hàn (mm)	Cường độ dòng điện hàn (A)	Điện áp hàn (V)	Lưu lượng khí bảo vệ (l/min)	Vận tốc hàn (m/s)	Tầm với điện cực (mm)
1.2	120	18	10	3.0	8

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

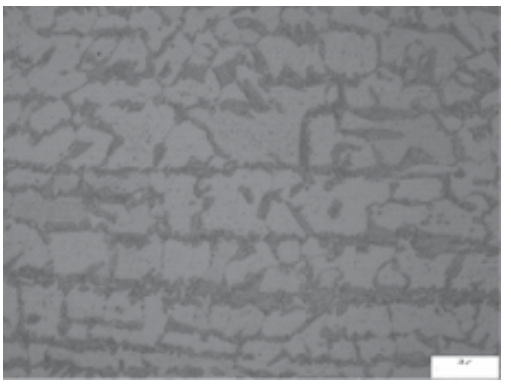
Cấu trúc thô đại của liên kết hàn giáp mối thép A572 – Grade 50 được mô tả trong Hình 2. Các vùng được đánh số thứ tự từ 1 đến 4 là các khu vực được sử dụng để khảo sát cấu trúc tế vi sau khi hàn. Vì liên kết hàn là cùng vật liệu nên hai phía của kim loại mối hàn có sự tương đồng về sự ảnh hưởng trong quá trình hàn nên cấu trúc và các đặc tính cơ học của hai phía là tương đương nên chỉ cần khảo sát một phía là đảm bảo yêu cầu đánh giá cấu trúc của liên kết hàn.



Hình 1. Dạng liên kết hàn được sử dụng trong nghiên cứu

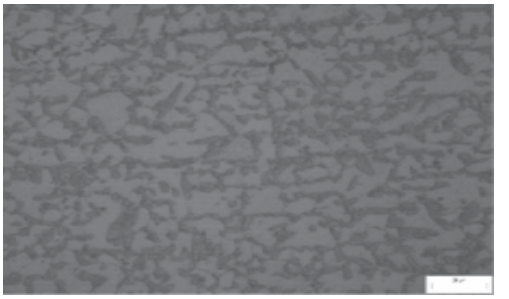


Hình 2. Cấu trúc thô đại liên kết hàn



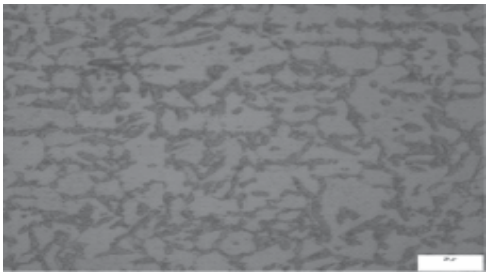
Hình 3. Cấu trúc tế vi khu vực số 1 trong Hình 2

Quan sát hình ảnh cấu trúc tế vi trong Hình 3 có thể thấy, với nền thép A572– Grade 50 là thép các-bon nên cấu trúc tế vi đặc trưng tại khu vực này là hai pha đặc trưng là Péc-lít (pha có màu tối) và pha là Fe-rít (pha có màu sáng). Với thành phần các nguyên tố có trong thép như đã mô tả trong các báo cáo [7, 8] thì đây là cấu trúc đặc trưng của loại thép này và khu vực khảo sát là khu vực phía xa nguồn nhiệt nên sự thay đổi về cấu trúc và sắp xếp cấu trúc tại khu vực này là không có sự thay đổi đáng kể nào.



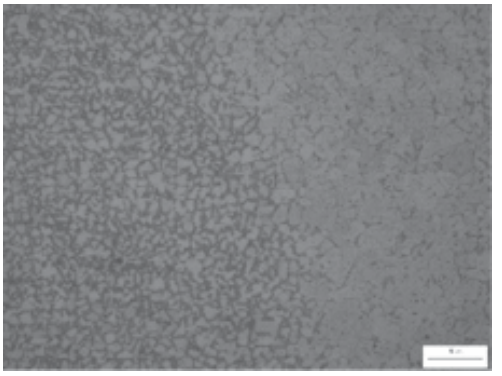
Hình 4. Cấu trúc tế vi khu vực số 2 trong Hình 2

Cấu trúc tế vi khu vực ảnh hưởng nhiệt của liên kết hàn được khảo sát tại vị trí số 2 trong Hình 2 được mô tả chi tiết trong Hình 4. Qua hình ảnh ta nhận thấy, cấu trúc tế vi đặc trưng tại khu vực này vẫn là cấu trúc đặc trưng của hai pha Péc-lít (pha có màu tối) và pha là Fe-rít (pha có màu sáng). Tuy nhiên, tại khu vực này, dưới tác động của nguồn nhiệt trong quá trình hàn nên cấu trúc tế vi có sự sắp xếp thiếu sự đồng nhất với sự xáo trộn và sự xuất hiện dày đặc hơn của cấu trúc pha Péc-lít.



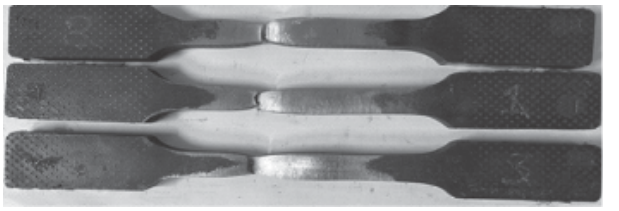
Hình 5. Cấu trúc tế vi khu vực số 3 trong Hình 2 ☞

Cấu trúc tế vi khu vực kim loại mối hàn, được khảo sát tại vị trí số 3 trong Hình 2 được mô tả trong Hình 5. Quan sát Hình 5 ta nhận thấy, đây là khu vực chịu ảnh hưởng chính năng lượng của nguồn nhiệt hàn, nhưng cấu trúc tế vi đặc trưng tại khu vực này không có sự thay đổi về cấu trúc pha, chỉ có sự thay đổi về kích thước và tại nhiều khu vực, cấu trúc này liên kết với nhau dưới dạng các sợi Péc-lít, ngoài ra, cấu trúc Péc-lít đơn, ngắn xuất hiện rải rác tại một số khu vực. Dạng cấu trúc tại khu vực này chịu sự tác động từ nguồn kim loại có trong dây hàn phụ bổ sung vào trong quá trình hàn và có thể giúp nâng cao cơ tính của liên kết hàn so với thông thường.



Hình 6. Cấu trúc tế vi khu vực số 4 trong Hình 2

Quá trình kiểm tra độ cứng tế vi được tác giả tiến hành sau khi đã hoàn thành việc kiểm tra cấu trúc tế vi của liên kết hàn. Các vị trí đã được đánh dấu sẵn tại các khu vực như mô tả trong Hình 2 cũng được tác giả sử dụng để kiểm tra độ cứng tế vi nhằm đánh giá sự thay đổi độ cứng tế vi của từng vùng trong quá trình hàn. Các kết quả kiểm tra độ cứng tế vi được thể hiện tương ứng trong Bảng 4. Từ các kết quả độ cứng tế vi của liên kết hàn được giới thiệu tại Bảng 4 ta có thể thấy, giá trị độ cứng tế vi của liên kết hàn có xu hướng tăng dần từ vị trí của tấm thép A572 – Grade 50 vào tới khu vực kim loại trong vùng mối hàn. Giá trị độ cứng nhỏ nhất được tìm thấy tại khu vực ảnh hưởng nhiệt (vị trí số 2) với giá trị là 157HV và giá trị lớn nhất được tìm thấy tại khu vực kim loại mối hàn với giá trị là 165HV, giá trị trung bình của các điểm khảo sát tương ứng là 157.25HV. Các mức độ cứng của liên kết cho thấy sự thay đổi độ cứng sau khi hàn không nhiều với mức chênh lệch nhiều nhất tương ứng 13HV khi so sánh vị trí kim loại mối hàn với vị trí vùng ảnh hưởng nhiệt.



Hình 7. Mẫu kiểm tra độ bền kéo liên kết hàn giáp mối thép A572 – Grade 50

Giá trị kiểm tra độ bền kéo liên kết hàn đối với năm mẫu được thể hiện trong Bảng 4. Qua các kết quả này ta có thể nhận thấy, khi mức năng lượng cung cấp vào khu vực hàn nhỏ nhất sẽ cho độ bền kéo nhỏ nhất (mẫu kéo số 1 và mẫu kéo số 2), kể cả liên kết hàn không bị các khuyết tật ngoại dạng. Với mức năng lượng đầu vào ở mức trung bình sẽ thuận lợi hơn cho việc hình thành liên kết hàn và cũng đảm bảo độ thấu tốt trong toàn bộ chiều dày của liên kết hàn (mẫu kéo số 3 và mẫu kéo số 4), tại hai mẫu kéo này cho giá trị lớn hơn hai mẫu trước và mẫu kéo số 3 đạt giá trị cực đại khi kiểm tra độ bền kéo. Khi dùng mức năng lượng lớn hơn, liên kết hàn cũng đạt giá trị độ bền kéo tốt, nhưng do nguồn nhiệt cao nên có tác động nhất định tới độ bền của liên kết hàn, điều này thể hiện độ bền kéo tại mẫu số 5 có giá trị lớn hơn mức nhiệt thấp, nhưng không được cao như khi sử dụng mức năng lượng trung bình. Các kết quả này cũng hoàn toàn phù hợp với những công bố trong các nghiên cứu [9, 10].

Bảng 4. Kết quả kiểm tra độ bền kéo năm mẫu hàn tương ứng

Mẫu số	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5
Độ bền kéo (MPa)	465	466	475	474	470

4. KẾT LUẬN

- Với các tham số chế độ hàn đã chọn, liên kết hàn giáp mối thép A572 – Grade 50 được sử dụng để chế tạo trụ điện gió gần bờ và trụ điện gió ngoài khơi tại Việt Nam đã được thực hiện thành công bằng quy trình hàn GMAW với các đặc tính cơ học và cấu trúc tế vi tốt khi sử dụng dây hàn lõi thuốc Q 71.1 RC.

- Độ bền kéo tối đa của khớp hàn được thử nghiệm cao hơn đáng kể so với thép không gỉ 304 và 201. Gãy xương thường xảy ra ở các tấm thép không gỉ SUS-201 khi được kiểm tra độ bền kéo.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **22/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. The World Bank, International Bank for Reconstruction and Development, "*Lộ trình điện gió ngoài khơi cho Việt Nam*", 2021.
[2]. https://vneconomy.vn/dien-gio-ngoai-khoi-viet-nam-tiem-nang-lon-nhung-van-chua-the-but-pha.htm.
[3]. Ma, Yong, et al., "*Investigation on optimization design of offshore wind turbine blades based on particle swarm optimization*". Energies 12.10 (2019): 1972.
[4]. https://www.metalsusa.com/a572-grade-steel/.
[5]. https://byvn.net/AW3E.
[6]. https://masteralloy.com.sg/wp-content/uploads/2024/05/PDS-BOEHLER-Q-71.1-RC-C1.pdf.
[7]. Güral, A. H. M. E. T., B. Ü. L. E. N. T. Bostan, and A. T. Özdemir, "*Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel*". Materials & design 28.3 (2007): 897-903.
[8]. Khorrami, M. S., Mostafaei, M. A., Pouraliakbar, H., & Kokabi, A. H. (2014), "*Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints*". Materials Science and Engineering: A, 608, 35-45.
[9]. Pathak, D., Singh, R. P., Gaur, S., & Balu, V. (2020), "*Experimental investigation of effects of welding current and electrode angle on tensile strength of shielded metal arc welded low carbon steel plates"*. Materials Today: Proceedings, 26, 929-931.
[10]. Nurdin, H., Purwantono, P., & Umurani, K. (2021), "*Tensile strength of welded joints in low carbon steel using metal inert gas (MIG) welding*". INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi, 21(3), 175-180.

MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC THU HỒI NĂNG LƯỢNG TRÊN XE LU BÁNH LỐP

SIMULATION OF THE ENERGY RECOVERY POWER TRANSMISSION SYSTEM ON A PNEUMATIC-TIRED ROAD ROLLER

Luyện Văn Hiếu[1,*], Trần Mạnh Duy[1], Nguyễn Đình Hạnh[2]
[1]Khoa Cơ khí Động lực, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên
[2]Khoa Công nghiệp – Xây dựng, Trường Cao đẳng Lai Châu
**Email: lvhieugt@utehy.edu.vn*

TÓM TẮT

Ngày nay, xe lu bánh lốp được sử dụng rộng rãi trong xây dựng công trình giao thông. Các dòng xe lu này thường có tải trọng lớn. Trong quá trình hoạt động, chúng chuyển đổi nhiên liệu hóa thạch thành động năng. Khi phanh hãm, động năng này tiếp tục được chuyển hóa thành nhiệt năng nhưng không được thu hồi, gây ra sự lãng phí. Do đó, việc nghiên cứu giải pháp tiết kiệm nhiên liệu và thu hồi năng lượng lãng phí này có ý nghĩa quan trọng. Bài báo này xây dựng một mô hình mô phỏng hệ thống truyền lực thu hồi năng lượng trên xe lu bánh lốp bằng Matlab – Simulink. Kết quả cho thấy khả năng thu hồi năng lượng trong quá trình phanh hãm của xe, từ đó mở ra hướng ứng dụng cải tiến xe lu bánh lốp nhằm giảm tiêu hao nhiên liệu và bảo vệ môi trường.

Từ khóa: *Xe lu bánh lốp; Hệ thống thu hồi năng lượng xe cơ giới.*

ABSTRACT

Nowadays, pneumatic tire rollers are widely used in the construction of transportation infrastructure. These rollers typically have a large load capacity. During operation, they convert fuel into kinetic energy. When braking, this kinetic energy is further transformed into thermal energy but is not recovered, leading to energy waste. Therefore, researching solutions to save fuel and recover this wasted energy is of great importance. This paper develops a simulation model of an energy recovery power transmission system for pneumatic tire rollers using Matlab – Simulink. The results demonstrate the ability to recover energy during the braking process, thereby opening up applications for improving pneumatic tire rollers to reduce fuel consumption and protect the environment.

Keywords: *Wheel rollers; Vehicle energy recuperation system.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh giá nhiên liệu ngày càng gia tăng và các yêu cầu khắt khe về bảo vệ môi trường, việc nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong các phương tiện thi công cơ giới, đặc biệt là xe chuyên dùng như xe lu bánh lốp, trở thành một nhu cầu cấp thiết. Xe lu bánh lốp thường hoạt động trong thời gian dài, với các chu kỳ tăng giảm tốc độ và đảo chiều hoạt động liên tục. Trong quá trình này, một lượng lớn năng lượng cơ học, đặc biệt là trong các pha hãm thường bị thất thoát dưới dạng nhiệt năng thông qua hệ thống phanh.

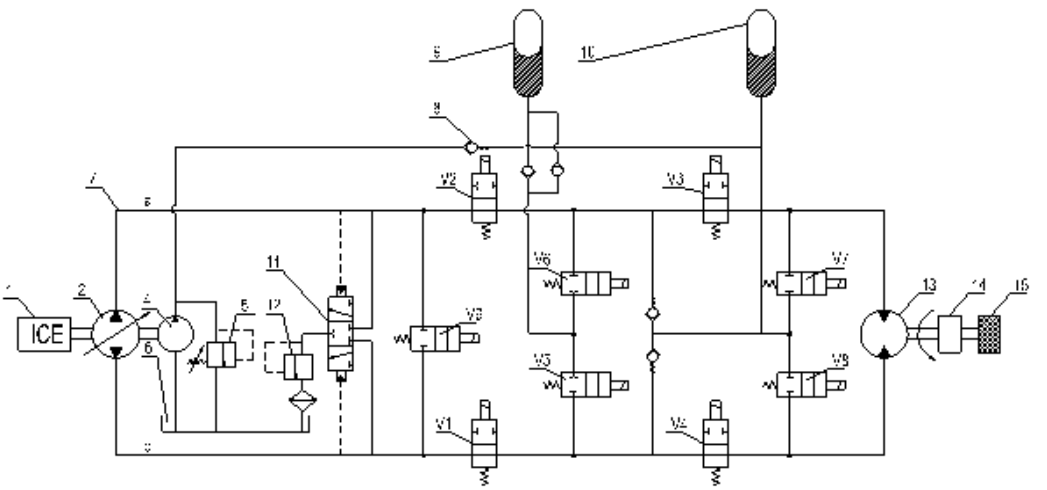
Hệ thống tái sinh năng lượng (ERS) là một giải pháp kỹ thuật đã được áp dụng rộng rãi trên xe cơ giới [1, 2, 3, 4, 5, 6] cho phép thu hồi một phần năng lượng bị thất thoát và chuyển đổi thành năng lượng điện hay áp năng thủy lực để sau đó tái sử dụng. Việc tích hợp hệ thống này lên xe lu bánh lốp truyền thống [7] không chỉ góp phần giảm tiêu hao nhiên liệu, mà còn mở ra hướng đi mới trong việc cải tiến các dòng xe lu truyền thống, cũng như phát triển các dòng xe chuyên dùng tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường.

Tuy nhiên, việc áp dụng công nghệ tái sinh năng lượng trên xe lu bánh lốp cũng đặt ra nhiều thách thức về mặt kỹ thuật, như: việc bố trí hệ thống truyền động thủy lực như thế nào và khả năng hoạt động của xe sau khi thay đổi hệ thống truyền động. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển một hệ thống tái sinh năng lượng phù hợp với đặc thù vận hành của xe lu bánh lốp là cần thiết và mang tính thực tiễn cao.

2. MÔ HÌNH ERS TRÊN XE LU BÁNH LỐP

2.1. Cấu hình sơ đồ hệ thống ERS trên xe lu bánh lốp

Dựa trên cơ sở hệ thống truyền lực di chuyển ở xe lu truyền thống [7], tác giả đã xây dựng một sơ đồ cấu hình hệ thống thu hồi động năng cho hệ thống truyền lực di chuyển của xe lu bánh lốp (Hình 1) và các chế độ hoạt động của xe lu được trình bày trong Bảng 1.



Hình 1. Cấu hình sơ đồ ERS gắn trên xe lu bánh lốp

1 - Động cơ đốt trong (ICE); 2 - Bơm thủy lực chính; 3 - Van 2/2; 4 - Bơm thủy lực phụ; 5 - Van điều chỉnh áp suất; 6 - Bình dầu thủy lực; 7 - Đường dầu a, b; 8 - Van 1 chiều; 9 - Bình tích áp H (áp suất cao); 10 - Bình tích áp L (áp suất thấp); 11 - Van thủy lực 3/3; 12 - Van điều chỉnh áp suất; 13 - Mô tơ thủy lực; 14 - Bộ truyền cơ khí; 15 - Bánh xe; V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9 - Van 2/2.

Bảng 1. Bảng trạng thái hoạt động của các valve theo các chế độ hoạt động của xe lu

Chế độ hoạt động của xe	Các valve điều khiển								
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Di chuyển tiến	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Phanh khi đang tiến	0	1	0	1	1	0	1	0	1
Di chuyển lùi	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Phanh khi đang lùi	1	0	1	0	0	1	0	1	1
Tăng tốc hỗ trợ tiến	1	1	1	0	1	0	0	1	0
Tăng tốc hỗ trợ lùi	1	1	0	1	0	1	1	0	0
Trong đó: 0 - Trạng thái van đóng; 1 - Trang thái van mở									

2.2. Mô hình hóa xe lu bánh lốp sử dụng ERS

a) Mô hình hóa xe lu chuyển động trên đường nằm ngang

Xe được giả thiết chuyển động trên đường ngang, do đó không có thành phần trọng lực theo phương chuyển động; đồng thời, các yếu tố như lực nâng, mô men lật và ảnh hưởng của gió ngang được bỏ qua. Mô hình chỉ xét chuyển động tịnh tiến một chiều theo phương nằm ngang, không xét đến chuyển động quay hay ảnh hưởng của hệ thống treo. Ta có phương trình tổng quát của xe:

$$m.\delta.\frac{dv}{dt} = F_t(t) - F_r - F_a \quad (1)$$

Trong đó:

v - Vận tốc di chuyển của xe [m/s], quan hệ giữa vận tốc xe v, vận tốc góc bánh xe ω_{bx} và bán kính bánh xe r_{bx}: $v = \omega_{bx}.r_{bx}$;

m - Khối lượng xe [kg];

δ - là hệ số tính đến ảnh hưởng của các trọng khối chuyển động quay của xe; hệ số δ được xác định như sau:

$$\delta = 1 + \frac{(\sum_{i=1}^{e} J_{bx}).g}{G.r_{bx}^2} \quad (2)$$

e - Số bánh xe;

G - Trọng lượng xe, được xác định:

$$G = mg \quad (3)$$

F_t - Lực tác dụng tại bánh xe từ mô tơ thủy lực [N];

$$F_t(t) = \begin{cases} F_{engine}(case: cruise) \\ -F_{regen}(case: braking) \\ F_{engine} + F_{regen}(case: accelerating) \end{cases} \quad (4)$$

F_{engine} - Lực tác động từ nguồn động cơ đốt trong [N];

F_{regen} - Lực tác động từ hệ thống thu năng lượng (dấu + khi tăng tốc, dấu – khi phanh) [N];

F_r - Lực cản lăn ở bánh xe [N], được xác định:

$$F_r = C_r.mg \quad (5)$$

C_r - Hệ số cản lăn; g - Gia tốc trọng trường (9,81 m/s²).

F_a - Lực cản gió tác động lên xe, được xác định:

$$F_a = \frac{1}{2}.\rho_a.C_d.A_f.v^2 \quad (6)$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

ρ_a - Mật độ không khí (kg/m³);
C_d - Hệ số cản khí động;
A_f - Diện tích cản trước (m²).

b) Mô hình bơm thủy lực

• *Mô men của bơm thủy lực T_p [N]*

Theo bơm thủy lực có mô men trên trục được xác định theo biểu thức dưới đây [8, 9]:

$$T_p = \frac{D_p \Delta p_p}{2\pi\eta_{tp}}\beta \quad (7)$$

Trong đó:
D_p - Lưu lượng riêng của bơm [m³/vòng];
Δp_{p_x} - Chênh lệch áp suất giữa buồng đẩy với buồng vào của bơm (N/m²):

$$\Delta p_p = p_{cr} - p_{cv} \quad (8)$$

p_{cr} - Áp suất dầu thủy lực ở buồng ra của bơm [N/m²];
p_{cv} - Áp suất dầu thủy lực ở buồng vào của bơm [N/m²];
η_{tp} - Hiệu suất cơ khí của bơm;
β - Hệ số tỷ lệ điều khiển lưu lượng (từ -1 đến 1).

• *Lưu lượng thực tế của bơm thủy lực Q_p*

Lưu lượng thực tế của bơm thủy lực, theo ta có lưu lượng thực tế của bơm thủy lực [8, 9]:

$$Q_p = \beta.D_p.\omega_p.\eta_{vp} \quad (9)$$

Trong đó:
η_{vp} - Hiệu suất thể tích của bơm;
ω_p - Tốc độ góc trục của bơm [rad/s].

c) Mô hình van một chiều

Van một chiều trên đường dầu thủy lực mục đích chỉ để cho dòng dầu thủy lực chuyển động theo một chiều nhất định, tuy nhiên ảnh hưởng của van là làm giảm áp suất của hệ thống, đây chính là sự tổn hao áp suất dầu thủy lực, mô hình hóa van một chiều được thể hiện thông qua phương trình [8, 9]:

$$Q_{vi} = C_d A_{vi}\sqrt{\frac{2\Delta P_{vi}}{\rho}} \quad (10)$$

$$\Delta P_{vi} = \frac{Q_{vi}^2 \rho}{2C_d^2 A_{vi}^2} \quad (11)$$

$$A_{vi}(p) = \begin{cases} A_{leak}, for \ldots p <= p_{crack} \\ A_{leak} + k.(p - p_{crack}) \quad for \ldots p_{crack} < p < p_{max} \\ A_{max}, for \ldots p >= p_{max} \end{cases} \quad (12)$$

$$k = \frac{A_{max} - A_{leak}}{p_{max} - p_{crack}} \quad (13)$$

Trong đó:
ΔP_{vi} - Áp suất giảm của van một chiều thứ i;
ΔQ_{vi} - Lưu lượng đi qua van một chiều thứ i;
C_d - Hệ số dòng chảy;
A_{vi} - Diện tích mặt cắt ngang của dòng chảy qua van i;
A_{max} - Diện tích mặt cắt ngang của dòng chảy qua van mở hoàn toàn;
A_{leak} - Diện tích rò rỉ dòng chảy của van khi đóng van;
p_{crack} - Áp suất mở van;
p_{max} - Áp suất cần thiết để mở van hoàn toàn.

d) Mô hình đường dầu thủy lực

Tổn thất áp suất cục bộ trên đường ống thủy lực được xác định như sau: Tổn thất dọc ☞

đường là tổn thất xảy ra trên đường di chuyển của chất lỏng, chủ yếu là do ma sát. Ta có biểu thức tính tổn thất áp suất dọc đường khi chất lỏng chảy tầng như sau [8, 9]:

$$\Delta p_{li1} = 10.(\lambda \frac{l_i}{d_i} + \xi_{vi}) \frac{\rho.v_{di}^2}{2.g} \quad (14)$$

Tổn thất cục bộ là tổn thất xảy ra khi dòng chất lỏng chảy qua các thiết bị thủy lực như van hoặc do biến dạng hay thay đổi hướng vận tốc của dòng chảy. Tổn thất áp suất do lực cản cục bộ được tính theo công thức sau:

$$\Delta p_{li2} = 10.\xi_i \frac{\rho.v_{di}^2}{2.g} \quad (15)$$

Trong đó:

ρ - Khối lượng riêng của dầu [kg/m^3];

g - Gia tốc trọng trường, g = 9,81 [m/s^2];

λ - Hệ số cản phụ thuộc vào hệ số Raynon (Re), trường hợp chảy tầng:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

$$Re = \frac{v_d.d}{\mu} \quad (17)$$

ξ_{vi} - Hệ số cản phụ thuộc vào đường ống thứ i;

ξ_i - Hệ số tổn thất cục bộ, được xác định theo từng thiết bị thứ i;

l_i - Chiều dài đường ống thứ i [m];

d_i - Đường kính ống dẫn dầu thứ i [m];

μ - Độ nhớt động học của dầu [m^2/s];

v_{di} - Vận tốc trung bình của dầu của đoạn thứ i [m/s]:

$$v_{di} = \frac{4.Q}{\pi.d_i^2} \quad (18)$$

Trong đó: Q - Lưu lượng chảy trong đường ống [m^3/s];

A_p - Tiết diện đường ống (m^2), sử dụng tiết diện ống tròn.

e) Mô hình mô tơ thủy lực

Mô tơ thủy lực là cơ cấu chuyển đổi năng lượng thế năng thủy lực thành động năng.

• Mô men trên đầu trục của mô tơ thủy lực T_m

Với mô tơ thủy lực, mô men trên trục của mô tơ thủy lực làm việc được xác định theo biểu thức dưới đây [8, 9]:

$$T_m = D_m \Delta_p \eta_{tm} \ [N.m] \quad (19)$$

Trong đó:

d_m - Lưu lượng riêng của mô tơ (m^3/vòng);

Δ_{Pm} - Chênh lệch áp suất giữa buồng đẩy với buồng vào của mô tơ [N/m^2]:

$$\Delta_P = P_{cvm} - P_{crm} \quad (20)$$

P_{crm} - Áp suất dầu thủy lực buồng cửa ra của mô tơ [N/m^2];

P_{cvm} - Áp suất dầu thủy lực buồng cửa vào của mô tơ [N/m^2];

η_{tm} - Hiệu suất cơ khí của mô tơ.

• Lưu lượng thực tế cung cấp cho mô tơ thủy lực Q_m

Lưu lượng thực tế của mô tơ thủy lực, ta có lưu lượng thực tế của mô tơ thủy lực [8, 9]:

$$Q_m = \frac{\omega_m D_m}{\eta_{vm}} \quad (21)$$

Trong đó:

η_{vm} - Hiệu suất thể tích của mô tơ thủy lực;

ω_m - Tốc độ góc trục của mô tơ thủy lực [rad/s].

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Quan hệ với tốc độ mô tơ thủy lực, bánh xe và tỷ số truyền của bộ truyền cơ khí i_o:

$$\omega_m = i_o \omega_{bx} \quad (22)$$

g) Mô hình van thủy lực

Lưu lượng dầu thủy lực chảy qua van được xác định theo biểu thức [8, 9]:

$$Q_v = C_v A_v \sqrt{\frac{2|\Delta P_v|}{\rho}}.\text{sign}(\Delta P_v) \quad (23)$$

Trong đó:

Δ_{Pv} - Áp suất giảm của van [Pa];

Q_v - Lưu lượng đi qua van [m^3/s];

C_v - Hệ số dòng chảy qua van;

A_v - Diện tích mặt cắt ngang của dòng chảy qua van [m^2];

ρ - Khối lượng riêng của dầu [kg/m^3].

h) Mô hình bình tích áp thủy lực

Bình tích năng thủy lực là cơ cấu dùng để lưu trữ năng lượng dưới dạng áp suất của dầu thủy lực, hiện nay bình tích năng thủy lực được sử dụng khá nhiều trong các hệ truyền dẫn thủy lực để điều hòa năng lượng thông qua áp suất và lưu lượng của chất lỏng làm việc.

Trong quá trình thu và tái sử dụng, nếu khí và môi trường không đủ thời gian truyền nhiệt ở bình tích năng thì quan hệ giữa thể tích V_g và áp suất p_g phù hợp với quá trình đoạn nhiệt. Ta giả thiết trong quá trình thu và tái sử dụng năng lượng không có sự trao đổi nhiệt ở bình tích năng do đó khí trong bình sẽ diễn ra theo quá trình đoạn nhiệt do vậy ta có biểu thức sau:

$$p_g V_g^k = p_o V_o^k = C \quad (24)$$

Trong đó: C - Hằng số;

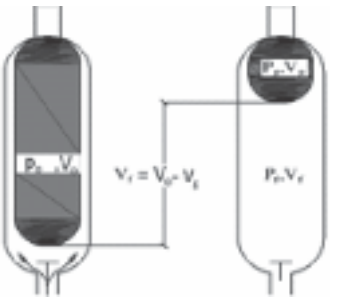
k - Hệ số mũ đoạn nhiệt, chọn khí ni tơ k = 1,4;

p_g - Áp suất của khí khi bị nén [N/m^2];

V_g - Thể tích của khí khi bị nén tương ứng với p_g [m^3];

p_o - Áp suất ban đầu của khí nitơ [N/m^2];

V_o - Thể tích ban đầu của khí nitơ [m^3].



Hình 2. Trạng thái khác nhau của bình tích áp thủy khí quá trình thu

Nếu thể tích chất lỏng nén vào là V_f, thì thể tích khí còn lại là:

$$V_g = V_o - V_f \quad (25)$$

Khi đó, áp suất trong bình được tính:

$$p_g = p_o \left(\frac{V_o}{V_o - V_f} \right)^k \quad (26)$$

Năng lượng thu hồi vào bình tích áp thủy lực được xác định theo biểu thức sau:

$$E_a = \int_V p_g dV_f \quad (27)$$

Trong đó:

E_a - Năng lượng bình tích năng [J];

p_g - Áp suất thủy lực bình tích năng [Pa];

V_f - Thể tích dầu thủy lực được nén vào bình tích năng [m^3].

Tỷ lệ thu hồi năng lượng:

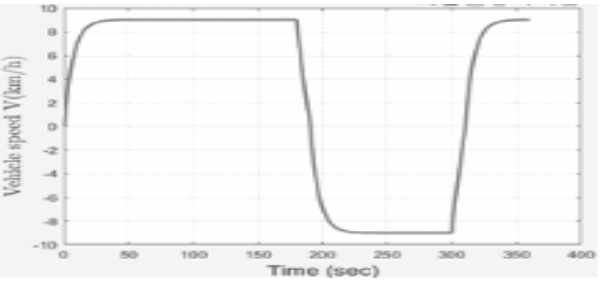
$$\alpha = \frac{E_a.100\%}{\left(\frac{m.v_o^2}{2} + \frac{e.J_{bx}\omega_{bxo}^2}{2}\right)} \quad (28)$$

3. MÔ PHỎNG

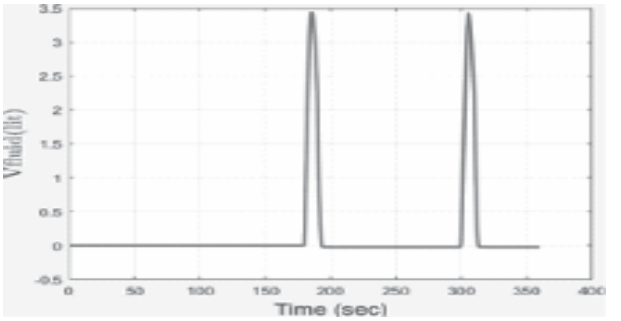
Trên cơ sở sơ đồ cấu hình trên Hình 1 cùng các phương trình mô hình hóa hệ thống từ (1) đến (27), tác giả đã thực hiện mô phỏng hệ thống tái sinh năng lượng gắn trên xe lu bánh lốp bằng chương trình Matlab – Simulink [10], sau khi nhập các thông số đầu vào (theo Bảng 2), ta có được một số kết quả được thể hiện trên Hình 3, 4, 5 và 6.

Bảng 2. Số liệu nhập vào chương trình

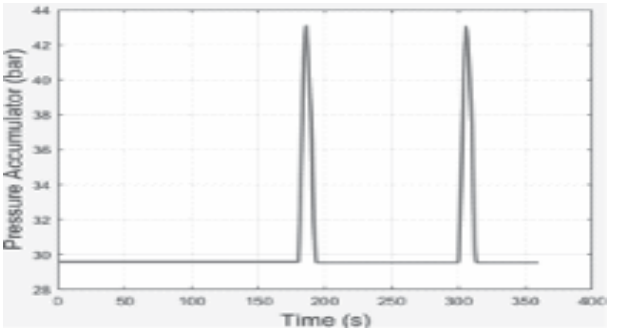
STT	Tên gọi	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng xe	m	9240	kg
2	Bán kính bánh xe làm việc	r_{bx}	0.50292	m
3	Lưu lượng riêng max của bơm thủy lực	D_p	$55*10^{-6}$	m^3/ vòng
4	Lưu lượng riêng max của mô tơ thủy lực (tính cho 3 mô tơ)	D_m	3x1000	cc/rev
5	Áp suất thủy lực ban đầu của bình tích áp	p_0	29.5	bar
6	Mô men quán tính bánh xe	J_{bx}	14.25	$kg.m^2$
7	Số lượng bánh xe	e	7	



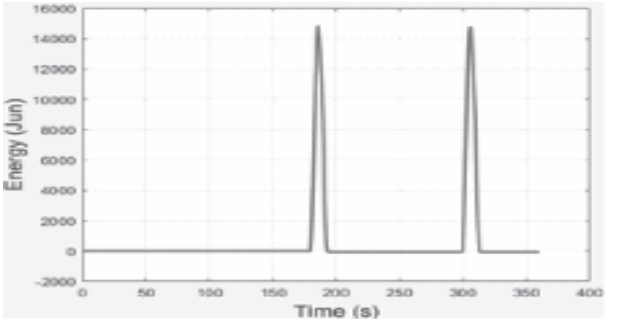
Hình 3. Vận tốc của xe lu trong quá trình hoạt động



Hình 4. Thể tích dầu thủy lực thu/xả trong quá trình xe hoạt động



Hình 5. Áp suất bình tích áp trong quá trình hoạt động của xe lu



Hình 6. Năng lượng thu được của bình tích áp trong quá trình hoạt động của xe lu

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Kết quả trình bày trong các Hình 3, 4, 5 và 6 cho thấy rõ sự thay đổi của vận tốc xe, lượng dầu nạp vào bình tích áp năng, áp suất trong bình tích áp, cũng như năng lượng thu được. Diễn biến cụ thể như sau: xe bắt đầu di chuyển tiến và tăng tốc từ 0 km/h đến 9 km/h (2.5 m/s). Tại thời điểm T = 180 s, xe thực hiện phanh, dầu thủy lực được đẩy vào bình tích năng, đạt thể tích 3,445 lít. Áp suất trong bình tăng từ 29,5 bar lên 43,1 bar và năng lượng thu được là 14.850 J vào thời điểm T = 185,4 s. Khi đó, xe dừng lại. Sau đó, xe tiếp tục hành trình theo hướng lùi; dầu trong bình tích áp được xả hết, áp suất giảm về mức ban đầu là 29,5 bar. Xe lu di chuyển lùi và tiếp tục tăng tốc đến vận tốc 9 km/h. Đến thời điểm T = 300 s, xe lại thực hiện quá trình phanh, bình tích năng được nạp lại, áp suất tăng lên 43,1 bar, dầu thủy lực được nạp vào bình đạt 3,445 lít, và năng lượng thu được tiếp tục đạt 14.850 J tại thời điểm T = 304,8 s. Sau đó, xe lại tăng tốc theo hướng tiến đến vận tốc 9 km/h; bình tích áp xả hết dầu và áp suất trở về mức ban đầu là 29,5 bar. Diễn biến kết quả này hoàn toàn phù hợp với quy luật vật lý và cho thấy sự tương đồng rõ ràng giữa các chu kỳ vận hành. Kết quả cũng cho thấy tỷ lệ thu hồi năng lượng đạt được là: 14850/30107*100% = 49%.

4. KẾT LUẬN

Kết quả mô phỏng hệ thống phanh tái sinh năng lượng tích hợp trên xe lu truyền thống cho thấy rõ khả năng vận hành của xe, cũng như hiệu quả thu hồi và tái sử dụng năng lượng của hệ thống. Tuy nhiên, để các kết quả này có giá trị thực tiễn cao hơn, cần được kiểm chứng thông qua những nghiên cứu thực nghiệm.❖

Ngày nhận bài: **14/5/2025**
Ngày phản biện: **29/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Josef Nevrl´y, Zdenˇek Nˇemec, "*Modeling of Road Roller Drive Equipped with Hydrostatic Recovery Of Kinetic Energy*". 23rd International Conference Engineering Mechanics 2017 Svratka, Czech Republic, 15 – 18 May 2017.

[2]. Boukehili A., Zhang Y.T., Zhao Q., Ni C.Q., Su H.F., Huang G.J., "*Hybrid vehicle power management modeling and refinement*". International Journal of Automotive Technology, 13 (6), pp.987-998, 2012.

[3]. Delafosse V., Stanton S., Sekisu T., Yun J., "*A methodology to use simulation at every stage of a hybrid vehicle design*". 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, art. no. 6422618, pp.1134-1138m, VPPC 2012.

[4]. Kanber B., Baglione M., "*Developing an extensible and concise simulink toolset for hybrid vehicle modeling and simulation*". SAE Technical Papers, 2011.

[5]. Nemec Z., "*Model of kinetic and pressure energy recovery – example 2*". Partial report of the project LF12029 (in Czech), Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, Brno, 2012.

[6]. Nemec Z., "*Valves timing of in recovery stand of FME (in Czech)*". Partial research report, FME BUT, 2013.

[7]. GW750-Shop-Manual, online: https://sakaiamerica.com/wp-content/uploads/2020/07/GW750-Shop-Manual.pdf

[8]. A. Esposito, "*Fluid Power with Applications*", 7th ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2009.

[9]. S. R. Mohan, "*Hydraulic and Pneumatic Controls: Understanding Made Easy*". New Delhi: McGraw-Hill Education, 2008.

[10]. The MathWorks, Inc., "*Simscape Fluids Documentation*" [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/index.html. [Accessed: May 6, 2025].

ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ MAY ĐẾN ĐỘ BỀN VÀ ĐỘ GIÃN ĐỨT ĐƯỜNG MAY 514 TRÊN VẢI DỆT KIM SINGLE

THE EFFECTS OF SEWING PARAMETERS ON THE TENSILE STRENGTH AND ELONGATION AT BREAK OF SEAMS FOR 514 STITCHES ON SINGLE KNITTED FABRICS

Đinh Mai Hương, Lê Thị Lành
Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

TÓM TẮT

Các sản phẩm may từ vải dệt kim có tính chất co giãn, do đó đường may phải đảm bảo khả năng co giãn tốt, chịu được lực tác động của lực trong quá trình sử dụng mà không bị đứt chỉ. Đường may tạo từ mũi may 514 được chọn phổ biến để may vải dệt kim nhờ khả năng co giãn tốt. Tuy nhiên, do đặc tính đàn hồi cao và cấu trúc đặc biệt của vải dệt kim, việc thiết lập các thông số công nghệ may như mật độ mũi may, lực căng chỉ kim và tốc độ may trở nên phức tạp, dễ dẫn đến hiện tượng đứt đường may do độ giãn đường may không phù hợp. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của mật độ mũi may, tốc độ máy và sức căng chỉ kim đến độ bền đứt và độ giãn đứt tương đối dọc đường may 514 theo cả hai hướng cột vòng và hàng vòng trên vải dệt kim single. Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2 Box-Willson để thiết kế thí nghiệm, ứng dụng phần mềm Design Expert 11.0 để xử lý và phân tích số liệu. Kết quả xây dựng được phương trình hồi quy thực nghiệm ảnh hưởng đồng thời của các thông số công nghệ may đến độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối đường may sử dụng mũi 514 trên vải dệt kim single.

Từ khóa: *Độ giãn đứt; Độ bền đứt; Mũi may 301.*

ABSTRACT

In the production of garments using stretchable knit fabrics, seam performance is crucial. Seams must exhibit adequate elasticity and strength to withstand mechanical stresses during wear without thread breakage. The 514 overlock stitch is widely employed for sewing knit fabrics due to its superior extensibility. However, the high elasticity and looped structure of knitted fabrics complicate the optimization of sewing parameters such as stitch density, needle thread tension, and sewing speed. Inappropriate settings can lead to seam failure, primarily due to insufficient seam elongation compatibility with the fabric's stretch characteristics. This article presents research results on the influence of stitch density, machine speed, and needle thread tension on the tensile strength and relative elongation at break of the 514 stitches, in both wale and course directions, on single jersey. The second-order orthogonal experimental planning method, Box-Wilson, was used to design the experiments, and Design Expert 11.0 software was applied to process and analyze the data. The results establish the regression equation for the simultaneous influence of sewing technological parameters on the tensile strength and relative elongation at break of the seam using 514 stitches on single jersey.

Keywords: *Elongation at break; Breaking strength; 301 lockstitch.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đường may không chỉ là phương tiện liên kết các chi tiết sản phẩm may mà còn đóng vai trò quyết định đến chất lượng, độ bền và tính thẩm mỹ của sản phẩm may. Đặc biệt đối với các sản phẩm làm từ vải dệt kim có tính chất co giãn thì đường may phải đảm bảo khả năng co giãn tốt, chịu được lực tác động của lực trong quá trình sử dụng mà không bị đứt chỉ. Trong số các loại đường may thì đường may tạo từ mũi may 514 được chọn phổ biến để may vải dệt kim nhờ khả năng co giãn tốt. Tuy nhiên, do đặc tính đàn hồi cao và cấu trúc đặc biệt của vải dệt kim, việc thiết lập các thông số công nghệ may như mật độ mũi may, lực căng chỉ kim và tốc độ may trở nên phức tạp, dễ dẫn đến hiện tượng đứt đường may do độ giãn đường may không phù hợp.

Đã có nhiều công trình nghiên cứu giải pháp nhằm nâng cao chất lượng đường may, tác giả Bùi Thị Loan [1] đã nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ may đến độ bền kéo đứt đường may 406 trên vải dệt kim TC tăng lên. Tác giả Nguyễn Thanh Bình [2] đã nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố như mật độ mũi may, chi số chỉ may đến độ bền mũi may 301 trên vải dệt thoi. Đinh Mai Hương và cộng sự [3] đã nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ may đến độ bền và độ giãn đứt đường may 301 trên vải dệt kim. Tác giả Islam và cộng sự [4] đã nghiên cứu ảnh hưởng của ba kiểu đường may can tạo từ hai loại mũi may 301, 401 và đến độ bền đường may trên các loại vải denim. Tác giả Rafiul Islam và cộng sự [5] đã phân tích hiệu suất và độ bền đường may trên vải dệt thoi 100% cotton, sử dụng các loại chỉ và mật độ mũi may khác nhau để xác định điều kiện may tối ưu. Tuy nhiên, vẫn còn thiếu các nghiên cứu chuyên sâu đánh giá đồng thời ba thông số công nghệ may gồm mật độ mũi may, tốc độ may và sức căng chỉ kim đối với đường may 514 trên vải dệt kim single, đặc biệt là phân tích hiệu ứng phi tuyến và tương tác giữa các yếu tố bằng mô hình thực nghiệm. Đây chính là khoảng trống mà nghiên cứu này hướng tới làm rõ.

Thực tế sản xuất hiện nay cho thấy các thông số may thường được thiết lập theo kinh nghiệm, thiếu cơ sở khoa học cụ thể, dẫn đến chất lượng đường may không ổn định. Do đó, việc nghiên cứu một cách hệ thống ảnh hưởng của các thông số công nghệ may đến độ bền và độ giãn đứt của đường may 514 trên vải dệt kim single là cần thiết. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp xác định được điều kiện may tối ưu, mà còn góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả sản xuất trong ngành may mặc.

2. ĐỐI TƯỢNG, NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Ảnh hưởng của mật độ mũi may, tốc độ may, sức căng chỉ kim tới độ bền và độ giãn đứt dọc đường may sử dụng mũi may 514 trên vải dệt kim đan ngang single. Vải có thành phần 65% polyester, 35% cotton, khối lượng 140g/m^2, mật độ cột vòng là 160 cột vòng/10cm, mật độ hàng vòng là 230 hàng vòng/10cm. Chỉ may thực nghiệm của hãng Coat Astra có chi số tex 27, thành phần 100% polyester.

2.2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Thực nghiệm xác định độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối dọc đường may

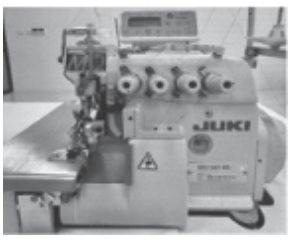
Thực nghiệm kéo đứt đường may theo phương pháp kéo đứt nửa chu trình, mẫu đường ☞

may chịu tải một chiều cho đến khi bị phá hủy mà không có thời gian nghỉ. Độ bền kéo đứt là lực lớn nhất mà mẫu thử chịu được khi bị kéo đứt, đơn vị đo là Niutơn (N). Độ giãn đứt tương đối là tỷ số của độ giãn đứt tuyệt đối so với độ dài làm việc của mẫu thử (khoảng cách 2 ngàm kẹp trước khi kéo đứt), đơn vị tính là %. Độ giãn đứt tương đối được tính theo công thức:

$$e = (l - L) / L * 100\% \quad (1)$$

Trong đó: e là độ giãn đứt tương đối (%); l là chiều dài của mẫu sau khi đứt (mm); L là chiều dài ban đầu của mẫu trước khi kéo đứt (mm).

Thí nghiệm kéo giãn mẫu vải có đường may thực hiện trên máy kéo vạn năng KEJIANHK, KJ-1066B với tốc độ không đổi là 60 mm/giây tại Phòng thí nghiệm của Viện Nghiên cứu Quân nhu, Cục Quân nhu, Tổng cục Hậu cần. Mẫu thử hình chữ nhật, có kích thước phần làm việc 50x100mm và kích thước mẫu thử 50x220mm theo tiêu chuẩn TCVN 1748-91 [6]. Các đường may sử dụng mũi may 514 được thực hiện trên máy vắt sổ MO-6816S-Juki, sức căng chỉ kim được đo bằng dụng cụ đo cầm tay của hãng Tajima - Nhật Bản.



Hình 1. Máy vắt sổ MO-6816S-Juki



Hình 2. Đường may 514 [7]

2.2.2. Thiết kế thí nghiệm

Các thông số mật độ mũi may, tốc độ máy và sức căng chỉ kim có quan hệ mật thiết, tác động đồng thời lên đường may, chính vì vậy trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2 nhằm thiết kế phương án thí nghiệm, từ đó xây dựng được các phương trình hồi quy thực nghiệm ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố nghiên cứu. Các phương án thí nghiệm được thiết kế theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao bậc 2 Box-Willson. Sử dụng phần mềm Design Expert 12.0 để thiết kế thí nghiệm và xử lý số liệu thực nghiệm.

Số thí nghiệm: $N = 2^k + n_0 + 2^k = 2^3 + 6 + 2x3 = 20$, trong đó có 8 thí nghiệm cơ bản, 6 thí nghiệm tại tâm và 6 thí nghiệm xung quanh tâm, mỗi phương án thí nghiệm lặp lại 5 lần và lấy giá trị trung bình. Chọn giá trị alpha là 1,52, khoảng biến thiên và mức mã hóa được thể hiện trong bảng 1, các phương án thí nghiệm trình bày trong bảng 2.

Bảng 1. Khoảng biến thiên (biến thực và biến mã hoá) của các yếu tố nghiên cứu

TT	Thông số	Biến thực	Biến mã hóa	Mức mã hóa				
				-1,52	-1	0	+1	+1,52
1	Mật độ (mũi/cm)	Md	X_1	3,2	3,5	4,5	5,5	4,7
2	Vận tốc (v/ph)	Vt	X_2	3237	3500	4000	4500	4762
3	Sức căng chỉ kim (cN)	Sc	X_3	49,5	60	80	100	110,4

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Phương trình hồi quy thực nghiệm có dạng tổng quát:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 \quad (2)$$

Trong đó:
Y: Hàm mục tiêu;
X_1, X_2, X_3: Biến mã hóa của các thông số công nghệ may;
a_0, a_1, a_2, a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}: Các hệ số hồi quy.

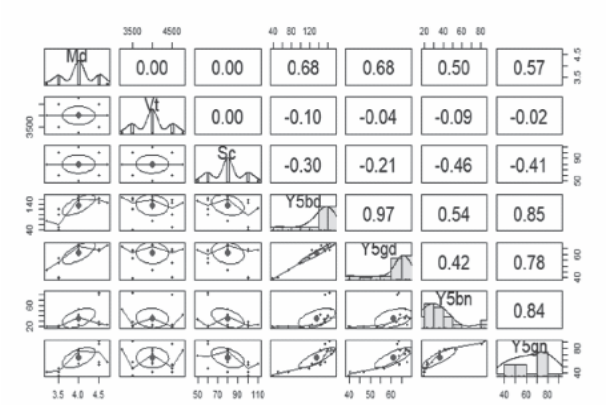
3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Kết quả xác định độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối dọc đường may sử dụng mũi 514

Kết quả thực nghiệm xác định độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối dọc đường may sử dụng mũi 514 theo hướng cột vòng và hàng vòng trên vải dệt kim single được trình bày trong bảng 2, trong đó: Y_{5bd} và Y_{5bn} lần lượt là độ bền kéo đứt theo hướng cột vòng và hàng vòng, Y_{5gd} và Y_{5gn} lần lượt là độ giãn đứt tương đối theo hướng cột vòng và hàng vòng.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm

Thí nghiệm	Biến mã hóa			Biến thực			Y_{5bd} (N)	Y_{5gd} (%)	Y_{5bn} (N)	Y_{5gn} (%)
	X_1	X_2	X_3	Md	Vt	Sc				
1	-1	-1	-1	3.5	3500	60	119.3	56.6	22.0	47.2
2	1	-1	-1	4.5	3500	60	163.4	63.6	83.8	91.6
3	-1	1	-1	3.5	4500	60	99.5	53.0	19.3	47.0
4	1	1	-1	4.5	4500	60	154.6	63.0	80.5	87.2
5	-1	-1	1	3.5	3500	100	39.1	39.4	19.6	35.0
6	1	-1	1	4.5	3500	100	154.6	62.6	28.5	57.8
7	-1	1	1	3.5	4500	100	49.3	40.4	19.7	40.4
8	1	1	1	4.5	4500	100	144.7	64.0	23.0	52.8
9	-α	0	0	3.2	4000	80	73.2	46.8	20.3	41.4
10	α	0	0	4.7	4000	80	145.6	67.4	22.9	58.2
11	0	-α	0	4	3237	80	166.7	67.0	52.3	78.4
12	0	+α	0	4	4762	80	144.6	64.4	42.4	77.0
13	0	0	-α	4	4000	49.5	152.6	63.6	34.8	67.8
14	0	0	+α	4	4000	110.4	125.6	63.8	23.1	53.8
15	0	0	0	4	4000	80	167.1	66.4	36.3	70.8
16	0	0	0	4	4000	80	173.3	68.4	36.6	76.2
17	0	0	0	4	4000	80	161.0	67.2	41.5	78.8
18	0	0	0	4	4000	80	157.4	68.6	36.3	76.2
19	0	0	0	4	4000	80	173.3	68.4	36.6	76.2
20	0	0	0	4	4000	80	161.0	67.2	41.5	78.8



Hình 3. Biểu đồ tương quan từng đôi một giữa các yếu tố

Hình 3 là biểu đồ tương quan từng đôi một giữa các yếu tố công nghệ may và độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối dọc đường may. Mật độ mũi may (Md) có mối tương quan với độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối theo hướng cột vòng (r = 0,67 và 0,68) và hàng vòng (r = 0,5 và 0,57), hệ số tương quan r mang dấu (+) cho thấy khi mật độ mũi may tăng thì độ bền và độ giãn tương đối có xu hướng tăng lên. Hệ số tương quan của sức căng chỉ kim (Sc) với độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối theo hướng cột vòng (r = -0,3 và -0,21) và hàng vòng (r = -0,46 và -0,41), hệ số tương quan r mang dấu (-) cho thấy khi sức căng chỉ kim tăng thì độ bền và độ giãn tương đối có xu hướng giảm. Tốc độ máy (Vt) không có mối tương quan với độ bền kéo đứt, độ giãn đứt tương đối dọc đường may.

3.2. Kết quả xác định ảnh hưởng của một số thông số công nghệ may đến độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối đường may sử dụng mũi 514

Kiểm định ý nghĩa của các mô hình bằng phần mềm Design Expert 11.0 trong bảng 3 cho thấy trị số p của bốn mô hình < 0,05, điều này cho thấy cả bốn mô hình đều có ý nghĩa thống kê, các biến đầu vào giải thích tốt biến đầu ra.

Bảng 3. Kiểm định ý nghĩa của mô hình

Mô hình	Y_{5bd}	Y_{5gd}	Y_{5bn}	Y_{5gn}
F-value	20,55	13,67	5,05	12,75
p-value	< 0,0001	0,0002	0,007	0,0002

Bảng 4. Trị số p của các hệ số hồi quy

Trị số p	a_1	a_2	a_3	a_{12}	a_{13}	a_{23}	a_{11}	a_{22}	a_{33}
Y_{5bd}	<0,0001	0,1965	0,0017	0,8036	0,0106	0,4361	<0,0001	0,0968	0,0042
Y_{5gd}	< 0,0001	0,6477	0,0366	0,7340	0,0120	0,5130	0,0002	0,0540	0,0132
Y_{5bn}	0,0069	0,5522	0,0092	0,8603	0,0068	0,9864			
Y_{5gn}	< 0,0001	0,7920	0,0009	0,4507	0,0241	0,7935	0,0002	0,9022	0,0056

Trên cơ sở phân tích mức ý nghĩa của các hệ số trong phương trình hồi quy kiểm định bởi chuẩn Student, các hệ số trong phương trình có trị số p < 0,05 là có ý nghĩa thống kê, biến x_j có ảnh hưởng tới Y, ngược lại là các hệ số không có nghĩa, biến x không ảnh hưởng tới Y. Theo kết quả bảng 4 loại bỏ các hệ số vô nghĩa xác định được 4 phương trình hồi quy thực nghiệm như sau:

• *Phương trình hồi quy thực nghiệm độ bền kéo đứt đường may 514 theo hướng cột vòng:*

- Phương trình với biến mã hóa:

$Y_{5bd} = 166,7 + 33,24X_1 – 15,4X_3 + 13,96X_1X_3 – 26,92X_1^2 – 14,14X_3^2$; $R^2 = 0,94$ (3)

- Phương trình với biến thực:

$Y_{5bd} = -666,06 + 219,64Md + 1,76Sc + 0,69 Md.Sc – 26,91Md^2 – 0,035Sc^2$; $R^2 = 0,94$ (4)

Phương trình hồi quy có hệ số xác định R^2 là 0,94 thể hiện sự thay đổi mật độ mũi may và sức căng chỉ kim giải thích 94% sự thay đổi của độ bền kéo đứt dọc đường may sử dụng mũi 514 theo hướng cột vòng trên vải dệt kim single. Yếu tố mật độ mũi may đóng vai trò quan trọng nhất, sức căng chỉ kim có ảnh hưởng ít hơn, vận tốc không có ảnh hưởng đến mô hình.

• *Phương trình hồi quy thực nghiệm độ giãn đứt tương đối đường may 514 theo hướng cột vòng:*

- Phương trình với biến mã hóa:

$Y_{5gd} = 66,86 + 7,53X_1 – 2,33X_3 + 3,72X_1X_3 – 5,98X_1^2 – 3,14X_3^2$; $R^2 = 0,88$ (5)

- Phương trình với biến thực:

$Y_{5gd} = -62,12 + 46,48Md – 0,30Sc + 0,18Md. Sc – 5,98Md^2 – 0,007Sc^2$; $R^2 = 0,88$ (6)

Phương trình hồi quy độ giãn đứt tương đối đường may 514 theo hướng cột vòng có hệ số xác định R^2 là 0,88 thể hiện sự thay đổi mật độ mũi may và sức căng chỉ kim giải thích 88% sự thay đổi của độ giãn đứt tương đối dọc đường may sử dụng mũi 514 theo hướng cột vòng trên vải dệt kim single.

• *Phương trình hồi quy thực nghiệm độ bền kéo đứt đường may 514 theo hướng hàng vòng:*

- Phương trình với biến mã hóa:

$Y_{5nb} = 36,05 + 11X_1 – 10,49X_3 – 13,85X_1X_3$; $R^2 = 0,69$ (7)

- Phương trình với biến thực:

$Y_{5bn} = -220,81 + 66,40Md + 2,59Sc – 0,69Md. Sc$; $R^2 = 0,69$ (8)

Phương trình hồi quy có hệ số xác định R^2 là 0,69 thể hiện sự thay đổi mật độ mũi may và sức căng chỉ kim giải thích 69% sự thay đổi của độ bền kéo đứt dọc đường may sử dụng mũi 514 theo hướng hàng vòng.

• *Phương trình hồi quy thực nghiệm độ giãn đứt tương đối đường may 514 theo hướng hàng vòng:*

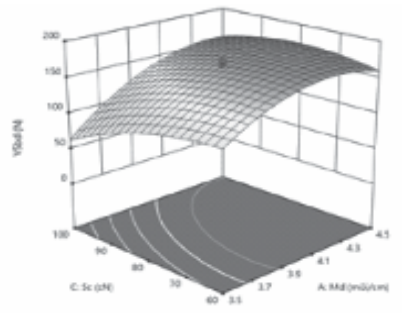
- Phương trình với biến mã hóa:

$Y_{5gn} = 76,50 + 11,50X_1 – 8,57X_3 – 6,17X_1X_3 – 12,09X_1^2 – 7,36X_3^2$; $R^2 = 0,91$ (9)

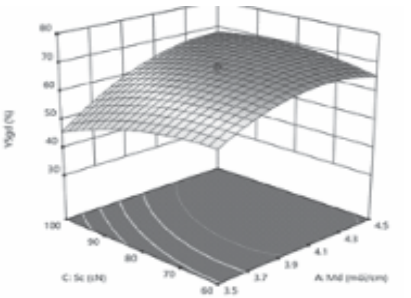
- Phương trình với biến thực:

$Y_{5gn} = - 413,93 + 145Md + 3,9Sc – 0,3 Md. Sc – 12,09 Md^2 – 0,018 Sc^2$; $R^2 = 0,91$ (10)

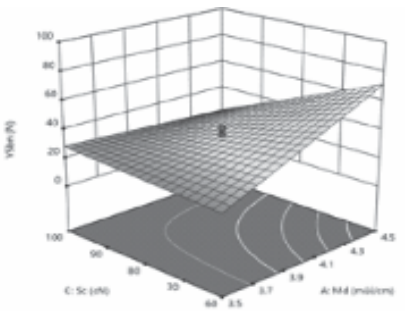
Phương trình hồi quy thực nghiệm độ giãn đứt tương đối đường may 514 theo hướng hàng vòng có hệ số xác định R^2 là 0,91 thể hiện sự thay đổi mật độ mũi may và sức căng chỉ kim giải thích 91% sự thay đổi của độ giãn đứt tương đối dọc đường may 514 theo hướng hàng vòng trên vải dệt kim single.



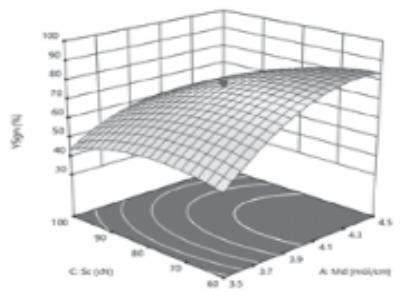
a)



b)



c)



d)

Hình 4. a) Biểu đồ độ bền kéo đứt đường may theo hướng cột vòng; b) Độ giãn đứt tương đối đường may theo hướng cột vòng; c) Biểu đồ độ bền kéo đứt đường may theo hướng hàng vòng; d) Độ giãn đứt tương đối đường may theo hướng hàng vòng

Hình 4 là các biểu đồ bề mặt 3D minh họa ảnh hưởng của yếu tố đầu vào đến kết quả đầu ra. Hình 4.a là biểu đồ ảnh hưởng đồng thời của mật độ mũi may và sức căng chỉ kim đến độ bền kéo đứt đường may theo hướng cột vòng. Khi mật độ mũi may Md tăng, độ bền kéo đứt tăng đáng kể, thể hiện rõ qua mặt cong hướng lên và chuyển từ màu xanh sang đỏ, độ bền kéo đứt đạt giá trị tối ưu khi mật độ mũi may là 5,3 mũi/cm, vận tốc máy 3500 vòng/phút và sức căng chỉ kim là 72,04cN. Hình 4.b là biểu đồ ảnh hưởng đồng thời của mật độ mũi may và sức căng chỉ kim đến độ giãn đứt tương đối theo hướng cột vòng. Giải phương trình hồi quy độ giãn đứt tương đối theo hướng cột vòng với biến thực xác định được độ giãn đứt tương đối tối ưu khi mật độ mũi may là 5,5 mũi/cm, vận tốc máy may 3500 vòng/phút và sức căng chỉ kim là 82,43cN.

Hình 4.c là biểu đồ ảnh hưởng của mật độ mũi may và sức căng chỉ kim đến độ bền kéo đứt đường may theo hướng hàng vòng. Khi mật độ mũi may Md tăng, độ bền kéo đứt tăng tuyến tính nhẹ, sức căng chỉ kim có ảnh hưởng yếu, thể hiện qua mặt phẳng gần như nghiêng đều theo trục Md. Hình 4.d là biểu đồ ảnh hưởng của mật độ mũi may và sức căng chỉ kim đến độ giãn đứt tương đối đường may theo hướng hàng vòng, giải phương trình hồi quy độ giãn đứt đường may theo hướng hàng vòng với biến thực xác định được độ giãn đứt tương đối tối ưu khi mật độ mũi may là 5,3 mũi/cm, vận tốc máy may 3500 vòng/phút và sức căng chỉ kim là 71,45 cN.

4. KẾT LUẬN

Mô hình hồi quy bậc hai được xây dựng cho các biến đầu ra là độ bền kéo đứt và độ giãn đứt tương đối theo cả hai hướng cột vòng và hàng vòng (Y_{5bd}, Y_{5bn}, Y_{5gd}, Y_{5gn}) đều có ý

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

nghĩa thống kê và độ phù hợp tương đối cao, cho phép đánh giá ảnh hưởng và dự đoán hiệu quả.

Trong các yếu tố khảo sát, mật độ mũi may là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến các yếu tố đầu ra, sức căng chỉ cũng có tác động, trong khi vận tốc may ảnh hưởng không đáng kể đến độ bền kéo đứt và độ giãn đứt đường may.

Biểu đồ bề mặt đáp ứng cho thấy tồn tại mối quan hệ phi tuyến và có tương tác giữa các yếu tố, đặc biệt giữa mật độ mũi may và sức căng chỉ kim, từ đó có thể xác định được các điều kiện tối ưu.❖

Ngày nhận bài: **09/5/2025**
Ngày phản biện: **30/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bùi Thị Loan, Nguyễn Thị Hồi, Đỗ Thị Tần, "*Nghiên cứu ảnh hưởng của chỉ số chỉ và mật độ mũi may đến độ giãn đứt, độ bền đường may 406 trên vải TC*". Tạp chí Nghiên cứu khoa học, Trường Đại học Sao Đỏ, số 1(72), trang 56-61, 2021.

[2]. Nguyễn Thanh Bình, "*Nghiên cứu các yếu tố chính ảnh hưởng đến độ bền đường may và mối quan hệ giữa các yếu tố*". Luận văn cao học Đại học Bách Khoa Hà Nội, 2012.

[3]. Đinh Mai Hương, Lê Thị Lành, "*Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ may đến độ bền và độ giãn đứt đường may 301 trên vải dệt kim*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 316, trang 179-185, 2024.

[4]. Mazharul Islam, Palash Kumar Saha, Md. Nazmul Islam, M. M. Rana, and Md. Abdul Hasan, "*Impact of Different Seam Types on Seam Strength*". Glob. Journals, vol. 19, no. 4, 2019.

[5]. M. M. Md. Rafiul Islam, A. K. M. Ayatullah Hosne Asif, Abdur Razzaque, Abdullah Al Mamun* and Department, "*Analysis of Seam Strength and Efficiency for 100% Cotton Plain Woven Fabric*". Int. J. Text. Sci., vol. 9, no. 1, pp. 21-24, 2020.

[6]. TCVN 5795 - 1994, *Phương pháp xác định độ bền kéo đứt và độ giãn đứt vải dệt kim*.

[7]. T. Karthik, P. Ganesan, and D. Gopalakrishnan, "*Apparel manufacturing technology*". Taylor & Francis Group, LLC. 2017.

ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN LOGIC TRONG XÁC ĐỊNH PHA CHẠM ĐẤT CHO LƯỚI ĐIỆN TRUNG ÁP MỎ

APPLICATION OF LOGIC ALGORITHM IN DETERMINING EARTH PHASE FOR MEDIUM VOLTAGE POWER GRIDS OF MINE

PGS,TS. **Đinh Văn Thắng**
Bộ môn Kỹ thuật Điện – Điện tử, Trường Đại học Mỏ – Địa chất
Email: dinhvanthang@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Việc xác định được chính xác pha chạm đất là cần thiết giúp cho công tác khắc phục sự cố và phục hồi hệ thống cung cấp điện được nhanh hơn, đồng thời giảm thiểu được tổn thất kinh tế cho mỏ do ngừng cung cấp điện lâu dài. Với lý do này, đã có nhiều nghiên cứu nhằm đưa ra các giải pháp kỹ thuật để xác định nhanh và chính xác pha chạm đất trong các mạng điện trung áp mỏ 6-35 kV trung tính cách ly. Việc ứng dụng thuật toán logic vào thiết bị xác định pha chạm đất cho lưới điện trung áp mỏ sẽ khắc phục được một số nhược điểm tồn tại của thiết bị theo nguyên lý tương tự không thể giải quyết được. Việc phát triển một thiết bị xác định pha chạm đất một pha nhờ ứng dụng các phần tử logic sẽ nâng cao độ tin cậy làm việc và hạn chế can nhiễu.

Từ khóa: *Hàm logic; Lưới điện trung áp mỏ; Dòng và áp thứ tự không; Góc pha; Tạo xung vuông.*

ABSTRACT

Accurately determining the phase affected by the ground fault is necessary to help the process of troubleshooting and restoring the power supply system be faster and reduce economic losses to the mine due to supply interruption. temporary power supply. For this reason, many scientists have researched and proposed technical solutions to quickly and accurately determine the phase affected by ground fault in isolated neutral 6 kV mine medium voltage power networks. The application of logic algorithms to devices to determine phase to ground for mine medium voltage grids of 6-35 kV isolated quadrants will overcome a number of existing disadvantages that similar devices cannot solve. Developing a single-phase ground-fault determination device using logic elements will improve working reliability and limit interference.

Keywords: *Logic function; Medium voltage power grid; Zero sequence voltage and current; Phase angle; Square pulse generation.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với các mạng điện trung áp mỏ từ 6 kV đến 35 kV, thường được trang trang bị các rơ le bảo vệ chạm đất một pha như: RTZ-51, ZZP-1, IC3-2/2, IC3-3M, ZZP -1… Các thiết bị này chỉ tác động cắt mạng khi có sự cố chạm đất một pha mà không chỉ rõ được cụ thể pha nào bị chạm đất, điều này dẫn đến khó khăn cho công việc tìm và khắc phục sự cố. Việc xác định chính xác pha bị chạm đất là cần thiết giúp cho việc phục hồi hệ thống cung cấp điện được nhanh hơn và giảm được tổn thất kinh tế cho mỏ do gián đoạn cung cấp điện. Với lý do này, tác giả giới thiệu một giải pháp xác định pha chạm đất ứng dụng kỹ thuật số - logic nhằm nâng cao độ tin cậy cung cấp điện ở mạng trung áp mỏ.

2. CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Khi tiến hành nghiên cứu lý thuyết mất đối xứng trong mạng ba pha trung tính cách ly cho thấy: luôn tồn tại hai tín hiệu thứ tự không bao gồm: điện áp thứ tự không $3U_0$ và dòng điện thứ tự không $3I_0$. Mối liên hệ của góc pha của điện áp thứ tự không $3U_0$ với điện áp pha U_f của pha tiếp xúc với đất luôn tuân theo quy luật nhất định, ta có thể dựa vào đó để phát hiện được pha bị chạm đất và pha không chạm đất. Trên thế giới, người ta đã đưa ra 7 phương pháp để xác định pha chạm đất như sau:

1) Tìm kiếm theo dấu hiệu giảm trị tuyệt đối điện áp pha chạm đất so với các pha còn lại không bị rò;

2) Tìm kiếm theo dấu hiệu tổng (hiệu) véc tơ điện áp pha (nguồn) với véc tơ điện áp thứ tự không;

3) Tìm kiếm theo dấu hiệu tổng (hiệu) véc tơ hai pha liên tiếp;

4) Tìm kiếm theo dấu hiệu suy giảm điện áp chỉnh lưu của pha sự cố chạm đất;

5) Tìm kiếm theo dấu hiệu góc dịch pha của các điện áp pha với điện áp thứ tự không;

6) Tìm kiếm theo dấu hiệu của hiệu trị tuyệt đối các giá trị điện áp pha;

7) Tìm kiếm theo dấu hiệu của hiệu trị tuyệt đối của hai nhóm tín hiệu: hiệu điện áp hai pha của nguồn và hiệu pha còn lại với điện áp thứ tự không.

Theo hướng tìm kiếm pha chạm đất phản ứng với tín hiệu góc dịch pha của các điện áp pha U_f với điện áp thứ tự không $3U_0$ sử dụng thuật toán logic để tìm ra pha bị sự cố là khả thi và tin cậy hơn cả. Nội dung của phương pháp này được tác giả trình bày trong nội dung bài viết này.

3. XÂY DỰNG MẠCH XÁC ĐỊNH PHA CHẠM ĐẤT ỨNG DỤNG MẠCH LOGIC

Sử dụng các ký hiệu sau đây để xây dựng hàm logic trong tìm kiếm pha chạm đất ở lưới điện trung áp mỏ 6-35 kV có trung tính cách ly:

1) Xác định vị trí của các véc tơ điện áp pha của lưới điện: $\overrightarrow{U_A}$; $\overrightarrow{U_B}$; $\overrightarrow{U_C}$; $\overrightarrow{U_0}$;

2) Các tín hiệu $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$, $u_0(t)$ được biến đổi thành dạng xung vuông với hai giá trị là 0 và 1 (Số hóa tín hiệu điện áp các pha);

3) Dùng các tín hiệu số $X_A(u_A)$, $X_B(u_B)$, $X_c(u_C)$ và $X_0(u_0)$ làm tín hiệu để tìm kiếm và xác định pha chạm đất.

☞

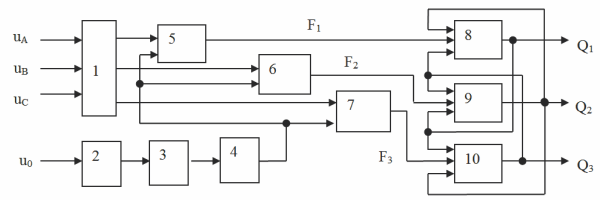
Mô tả hàm logic cho mạch xác định pha chạm đất như sau:

$F_1 = X_A[D^{(t)}X_0] = [0; 1];$
$F_2 = X_B[D^{(t)}X_0] = [0; 1];$
$F_3 = X_C[D^{(t)}X_0] = [0; 1];$

Trong đó, D(t) – Hàm trễ thời gian với lượng trễ Δt, (ms).

Các giá trị 0 và 1 ứng với kết quả xác định đầu ra khối tìm pha chạm đất với kết quả: hàm F = 0 → không chạm đất và hàm F = 1 → có chạm đất.

Với mô tả bằng thuật toán logic xác định pha chạm đất như trên, sơ đồ khối chức năng của mạch phát hiện pha chạm đất được trình bày trên hình vẽ 1.



Hình 1. Sơ đồ khối chức năng của mạch xác định pha chạm đất sử dụng IC logic

Chức năng của các khối trong sơ đồ trên được diễn giải như sau:

1) Khối (1) xác định vị trí véc tơ điện áp các pha $\overrightarrow{U_A}$; $\overrightarrow{U_B}$; $\overrightarrow{U_C}$. Phạm vi của từng pha nằm trong dải 120°;

2) Khối (2) khuếch đại và biến đổi điện áp thứ tự không u_0 thành tín hiệu xung vuông với độ rộng 10ms (nửa chu kỳ âm);

3) Khối (3) tạo khoảng thời gian trễ xung mang tín hiệu u_0 với thời gian trễ Δt = (5ms ± 1 ms);

4) Khối (4) xử lý dạng xung vuông X_0 50% thành xung có độ rộng 1%;

5) Khối (5, 6, 7) các trigger D ghi nhận vùng tồn tại đồng thời 2 tín hiệu chạm đất X_0 và $X_{(A, B, C)}$.

Khối (8, 9, 10) là các trigger RS khóa liên động chỉ cho phép duy nhất 1 thông tin về pha chạm đất.

Nguyên lý làm việc của mạch như sau:

• Khi không chạm đất, các điện áp pha so với đất tạo thành hệ đối xứng nên tại điểm trung tính nhân tạo O so với đất không có điện áp U_0, vì vậy khối (2) không nhận được tín hiệu vào, tại cửa ra của các khối 2, 3, 4 không có xung. Tại cửa vào, các khối ghi 5, 6, 7 lần lượt có 3 xung liên tiếp có độ rộng 6,6 ms (tương ứng 120° điện của hệ thống ba pha) đi vào các khối này. Do không có xung hẹp X_0 của tín hiệu U_0 nên cửa ra của ba khối này có mức tín hiệu đều bằng 0, khối khóa liên động không nhận được tín hiệu báo trạng thái có chạm đất, vì vậy tất cả các đầu ra Q_1, Q_2, Q_3 mang thông tin chạm đất của các pha A, B, C đều bằng 0.

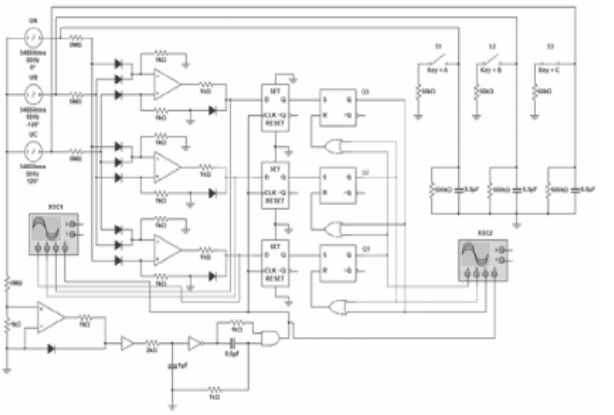
• Khi chạm đất (ví dụ pha A), các điện áp pha so với đất mất đối xứng nên điểm trung tính nhân tạo O có điện áp U_0, vì vậy khối (2) nhận được tín hiệu vào U_0, sau khi khuếch đại sơ bộ và chuyển đổi nó ra dạng xung vuông có độ rộng 10 ms (nửa chu kỳ của điện áp), khối 3 làm chậm xung này đi khoảng Δt ≈ 5 ms, khối 4 sẽ thực hiện thu hẹp độ rộng xung vào nó đến khoảng 60 μs (khoảng 1° điện trong 1 chu kỳ). Tại cửa vào, các khối ghi 5, 6, 7 ngoài tín hiệu lần lượt có 3 xung luân phiên độ rộng 6,6 ms (tương ứng 120° điện của hệ thống ba pha) đi vào các khối này còn có thêm xung hẹp của tín hiệu U_0. Khi chạm đất pha A, xung hẹp này sẽ

nằm trong vùng tồn tại của tín hiệu xung pha A (cửa vào khối 5), còn lại các khối 6 và 7, do xung hẹp X_0 của tín hiệu U_0 và các xung vuông X_B, X_C xuất hiện không đồng thời nên cửa ra của hai khối này vẫn có mức tín hiệu bằng 0. Khối khóa liên động nhận được tín hiệu báo trạng thái có chạm đất pha A, vì vậy, đầu ra Q_1 có mức 1 (chạm đất tại pha A). Tín hiệu 1 tại cửa ra Q_1 sẽ cấm các trigger Q_2, Q_3 thay đổi trạng thái bên trong nó, vì vậy cửa ra của chúng nhận giá trị 0, mang thông tin các pha B, C không chạm đất.

• Tại thời điểm cấp nguồn, các cửa R (reset) của trigger khóa liên động được đặt lại về chế độ sẵn sàng chờ tác động cho lần kế tiếp.

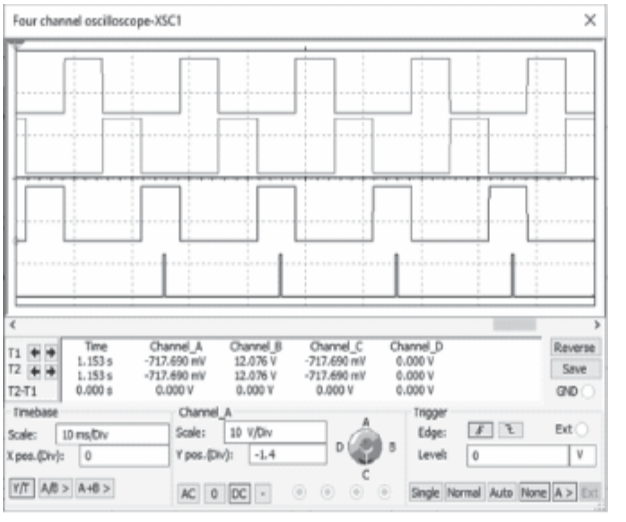
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG MẠCH VÀ THẢO LUẬN

Để kiểm nghiệm khả năng hoạt động của sơ đồ mạch xác định pha chạm đất mạng điện trung áp mỏ, tác giả tiến hành mô phỏng mạch xác định pha chạm đất trên phần mềm mô phỏng mạch điện – điện tử thông dụng NI Multisim. Mạch được xây dựng trên mô hình mạng điện ba pha cấp điện áp trung áp 6 kV. Điện trở cách điện của mạng chọn ở điều kiện đặc trưng của các hệ thống cung cấp điện mỏ hiện nay: điện trở cách điện của pha với đất R_f = 500 kΩ; C_f = 0,5μF. Điện trở chạm đất được lấy các giá trị 1, 10, 20, 30, 50 kΩ. Với các số liệu được lựa chọn cho mô hình mô phỏng mạch xác định pha chạm đất bằng phần mềm NI Multisim cho kết quả xác định đúng như nguyên lý làm việc của mạch đã được phân tích ở trên.



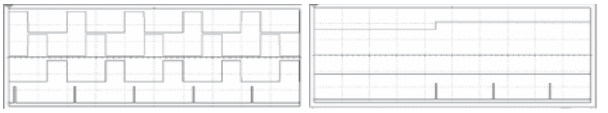
Hình 2. Sơ đồ mô phỏng mạch điện xác định pha chạm đất trên phần mềm NI Multisim

Hình 2 là sơ đồ mạch điện mô phỏng lưới điện trung áp mỏ có điện áp pha 3465V, điện trở cách điện pha so với đất R = 500 kΩ, điện dung 1 pha so với đất 0,5 μF. Mạch điện tử xác định pha chạm đất gồm các vi mạch so sánh và mạch logic số.

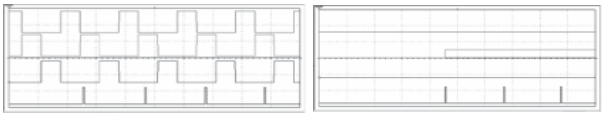


Hình 3. Kết quả mô phỏng tín hiệu đầu ra các khối (1) và (4)

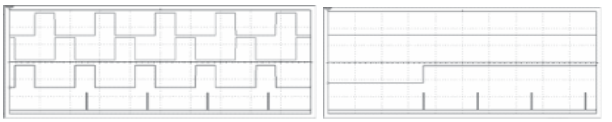
Kết quả mô phỏng trong hình 3 theo thứ tự từ trên xuống là tín hiệu xung đầu ra của các mạch tạo xung sau xử lý của các pha và điện áp thứ tự không (X_A, X_B, X_C và X_0).



(a) Chạm đất pha A: Xung X_0 nằm trong vùng X_A; $Q_1 = 1; Q_2 = 0; Q_3 = 0$



(b) Chạm đất pha B: Xung X_0 nằm trong vùng X_B; $Q_1 = 0; Q_2 = 1; Q_3 = 0$



(c) Chạm đất pha C: Xung X_0 nằm trong vùng X_C; $Q_1 = 0; Q_2 = 0; Q_3 = 1$

Hình 4. Kết quả mô phỏng xác định pha chạm đất

Từ kết quả mô phỏng trong hình 4 cho thấy sơ đồ có khả năng xác định chính xác pha chạm đất. Cụ thể, khi sự cố chạm đất xảy ra ở một pha nào đó thì xung X_0 sẽ nằm trọn trong vùng nhận diện (xung 120°) của pha đó, đồng thời mức logic đầu ra Q của pha đó bằng 1, trong khi hai pha còn lại có mức logic 0.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày sơ đồ khối và sơ đồ nguyên lý của mạch xác định pha chạm đất trong lưới điện trung áp trung tính cách ly, sử dụng các phần tử số logic. Kết quả mô phỏng cho thấy mạch đã tạo thành công các xung tín hiệu điện áp pha và điện áp thứ tự không (X_A, X_B, X_C và X_0), trong đó xung X_0 chỉ xuất hiện khi xảy ra sự cố chạm đất và luôn nằm trọn trong khoảng thời gian tồn tại của xung X_K – tín hiệu đại diện cho pha sự cố. Mạch khóa liên động đầu ra được thiết kế hợp lý, cho phép xác định chính xác và duy nhất một pha bị sự cố, góp phần nâng cao độ tin cậy trong việc phát hiện sự cố. Nhờ sử dụng các phần tử so sánh và logic số, mạch đạt được tính ổn định và độ tin cậy cao trong vận hành. Giải pháp này có tiềm năng ứng dụng hiệu quả trong việc nâng cao chất lượng thiết bị tự động nối tắt pha chạm đất xuống đất tại các lưới điện trung áp 6 kV mỏ hầm lò, qua đó góp phần bảo đảm an toàn điện cho con người và thiết bị trong điều kiện vận hành đặc thù của ngành khai thác mỏ hiện nay.❖

Ngày nhận bài: **01/4/2025**
Ngày phản biện: **11/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Буксторов В.Ф.; Поляков В.Е., "*Устройство для токовой направленной защиты от однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралю*". Изд. Вузов Электромеханика. -1987, No5 – СТр.119-122.

[2]. Буксторов В.Ф.; Щуцкий В.И., "*Защита от замыканий на землю в электроустановках 6-35 кВ*". Изд. Екатенбург, 1999. Стр. 233-241.

MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHUN PU TRONG SẢN XUẤT TÔN 5 SÓNG VỚI TIA PORTAL

SIMULATION OF PU SPRAYING SYSTEM CONTROL FOR 5- WAVE SHEET PRODUCTION WITH TIA PORTAL

Nguyễn Thị Ngọc Huyền
Khoa Cơ khí, Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội
Email: huyen.nguyenthingoc@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống dây chuyền sản xuất tôn lợp 5 sóng, 3 lớp có lớp Polyurethane Foam (PU) được phun ở giữa lớp tôn và lớp giấy bạc PVC làm lớp cách nhiệt, cách âm, chống thấm cho tôn lợp mái, do đó hệ thống phun PU cần hoạt động đồng thời, liên tục đảm bảo sản xuất với năng suất ổn định, đạt yêu cầu kỹ thuật. Bài báo này đề xuất mô phỏng thiết kế hệ thống điều khiển phun PU trên nền tảng TIA Portal bao gồm điều khiển cụm băng tải, hệ thống gia nhiệt, hệ thống phun hóa chất, súng phun PU và làm sạch. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống phun PU đáp ứng được các yêu cầu hoạt động tốt của các thiết bị, cảm biến và chuyển động, có thể ngăn chặn hiệu quả các thao tác sai trong quá trình vận hành đồng thời nâng cao đáng kể độ an toàn cho dây chuyền sản xuất tôn 5 sóng.

Từ khóa: *Mô phỏng; TIA Portal; Tôn cách nhiệt; PU.*

ABSTRACT

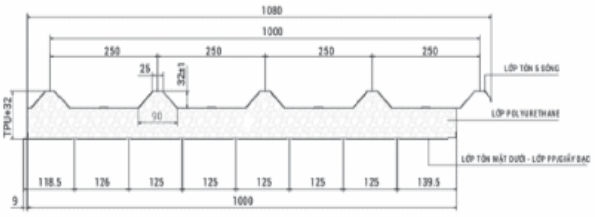
The five-wave, three-layer roofing sheet production line incorporates a layer of polyurethane sprayed between the steel substrate and a PVC-coated aluminum foil to provide thermal insulation, sound attenuation, and waterproofing. Consequently, the PU-spraying system must operate synchronously and continuously to ensure stable throughput and compliance with technical specifications. This paper presents a simulation-based design of the PU-spraying control system implemented in the TIA Portal environment, encompassing the conveyor unit, heating system, chemical metering and spraying stations, PU spray gun, and cleaning module. Simulation results demonstrate that the proposed control scheme meets operational requirements for equipment, sensors, and actuator movements; effectively prevents incorrect operational procedures; and substantially enhances the safety of the five-wave roofing sheet production line.

Keywords: *Simulation; TIA Portal; Insulated roofing sheet; PU.*

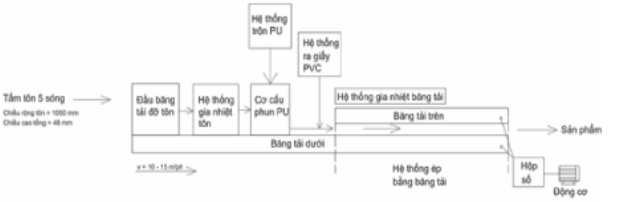
1. TỔNG QUAN

PU là một loại nhựa dạng bọt xốp được tạo thành từ hai loại chất lỏng chính là Polyols và Isocyanate. Hai thành phần này được trộn với nhau bằng máy cao áp chuyên dụng. Sau khi trộn sẽ tạo ra phản ứng hóa học, tùy theo từng loại hóa chất Polyols mà tốc độ phản ứng sẽ khác nhau. Sau khi phản ứng xong, thành phẩm được tạo thành chính là bọt xốp PU Foam. Phun PU là một quy trình khép kín bắt đầu từ lúc phối trộn 2 thành phần lỏng và cuối chu trình sẽ tạo ra sản phẩm bọt xốp PU Foam đóng rắn ngay trên bề mặt vật liệu. Độ dày của lớp PU tùy theo yêu cầu của công trình. Lớp PU có khả năng cách nhiệt tốt, chống oxi hóa hiệu quả, độ đàn hồi tốt và có khả năng kết dính cao với các loại vật liệu khác [1, 2].

Quy trình sản xuất tôn mát 5 sóng PU 3 lớp gồm 5 giai đoạn. Giai đoạn 1 (kiểm soát nhiệt độ hóa chất và nhiệt độ băng tải): Polyurethane Foam được tạo thành từ hai loại hóa chất chính là Polyols và Isocyanate, để tính chất của lớp PU được ổn định sau khi pha trộn, nhiệt độ của hai hóa chất trước khi khuấy trộn cần đảm bảo ở mức 25 ÷ 40 °C. Sau khi 2 hóa chất được trộn lẫn, nhiệt độ tối ưu cho quá trình giãn nở của hóa chất là từ 50 ÷ 60 °C. Giai đoạn 2 (gia nhiệt tôn): tôn sau khi cán thành biên dạng 5 sóng được chuyển vào băng tải đỡ (băng tải dưới) và được gia nhiệt khi đi qua hệ thống gia nhiệt sử dụng hệ thống đèn sấy. Giai đoạn 3 (phun hóa chất PU lên bề mặt tôn): tôn sau khi được gia nhiệt được đưa vào cụm phun hóa chất PU, tại đây hóa chất được trộn bằng súng phun chuyên dụng và phun lên bề mặt tôn. Giai đoạn 4 (thêm lớp PP/PVC): cuộn giấy PP/PVC xả lớp PP/PVC vào hệ thống ép đồng thời với tấm tôn sau khi được phun lớp PU. Giai đoạn 5 (ép sản phẩm): Hệ thống ép bao gồm hai băng tải trên dưới. Băng tải dưới sẽ có biên dạng tương đồng với biên dạng của tấm tôn và cần chính xác với biên dạng tại hai sóng tôn ngoài cùng. Tấm băng tải bên trên thì sẽ có biên dạng là tấm phẳng có nhiệm vụ ép xốp PU. Khoảng cách giữa băng tải trên với dưới chính là chiều dày xốp PU mong muốn. Sau 5 giai đoạn, sản phẩm sẽ được cắt theo chiều dài mong muốn. Thông số tôn được trình bày ở hình 1, lớp tôn 5 sóng dày 0.30 ~ 0.50mm; lớp PU có độ dày có thể: 20, 40, 50, 60 mm; lớp tôn mặt dưới dày khoảng 0.30 ~ 0.45mm; Kích thước hiệu dụng: 1000/1080 mm. Sơ đồ nguyên lý thể hiện các cụm chi tiết chính trong hệ thống phun PU trên hình 2 [3].



Hình 1. Thông số tôn PU 5 sóng 3 lớp (Tôn -PU-PVC)



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý dây chuyền sản xuất tôn PU 5 sóng

Bài báo này đưa ra một phương án thiết kế điều khiển tự động hệ thống phun PU sử dụng PLC và mô phỏng quá trình vận hành hệ thống trên phần mềm TIA Portal. Từ kết quả mô phỏng, có thể đánh giá hiệu suất của hệ thống điều khiển PLC và so sánh với hệ thống điều khiển truyền thống, đề xuất khả năng tích hợp các thiết bị phù hợp, kiểm soát lỗi hoạt động nhằm nâng cao chất lượng, năng suất trong quá trình sản xuất tôn PU 5 sóng.

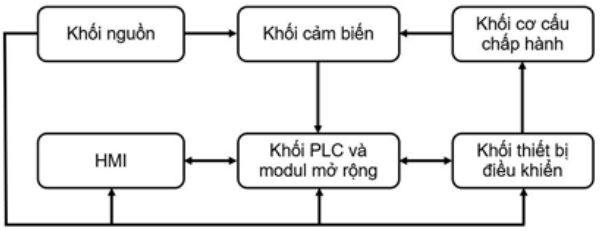
2. ĐIỀU KHIỂN PHUN PU VÀ MÔ PHỎNG VỚI TIA PORTAL

2.1. Nguyên lý điều khiển hệ thống phun PU

Điều khiển hệ thống phun PU cho tôn 5 sóng gồm: điều khiển cụm băng tải và điều khiển cụm phun hóa chất. Hệ thống điều khiển phun PU cần đảm bảo các yếu tố sau:

- Đảm bảo hóa chất Polyol Blend, Isocyanate có sẵn trong bình chứa và nhiệt độ hóa chất luôn ở mức quy định trong quá trình sản xuất.
- Bơm hóa chất ra súng phun chuyên dụng luôn đảm bảo lưu lượng với tỷ lệ hóa chất giữa Polyol Blend và Isocyanate theo yêu cầu. Làm sạch súng phun bằng hóa chất chuyên dụng sau mỗi lần sản xuất.
- Tốc độ băng truyền luôn ổn định. Nhiệt độ băng tải ép và nhiệt độ tôn luôn ở ngưỡng cho phép.
- Hiển thị các thông số trong quá trình vận hành hệ thống như nhiệt độ hóa chất, nhiệt độ băng tải, nhiệt độ tôn, tốc độ băng tải, báo lỗi và dừng toàn bộ hệ thống khi gặp sự cố.

Sơ đồ khối hệ thống điều khiển phun PU được thể hiện ở hình 3. Trong đó, khối cảm biến đo nhiệt độ ở các bộ phận gia nhiệt và đo tốc độ băng tải. HMI là màn hình hiển thị và điều khiển hệ thống. Khối PLC và module mở rộng là bộ điều khiển trung tâm gồm PLC và các module mở rộng DI/DO, module mở rộng analog AI/AO. Khối thiết bị điều khiển gồm các thiết bị điều khiển như contactor, relay, biến tần, nút bấm. Khối cơ cấu chấp hành thực hiện các hoạt động của hệ thống bao gồm động cơ băng tải, động cơ cần lắc, bơm vào hóa chất, bơm ra hóa chất, gia nhiệt hóa chất, gia nhiệt băng tải ép, gia nhiệt tôn, van điện từ điều khiển súng phun và điều hướng hóa chất làm sạch MC [4, 5].



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển phun PU

2.2. Phương pháp điều khiển [6-8]

a) Phương pháp điều khiển

• Điều khiển tốc độ băng tải:

Vận tốc của động cơ băng tải được tính theo công thức:

$$N = 60x\frac{f}{q}x(1-s) \text{ (vòng/phút)} \qquad (1)$$

Trong đó: N - Tốc độ động cơ (vòng/phút); f - Tần số của dòng điện (thường là 50Hz); p - Số cặp cực; s - Hệ số trượt.

Dựa vào tốc độ yêu cầu của hệ thống, ta tính được tần số dòng điện cần chỉnh và điều chỉnh tần số của dòng điện thông qua biến tần. Tốc độ băng tải có thể được đo bằng các thiết bị đo vận tốc là Encoder. Tôn và băng tải được gia nhiệt bằng cách dùng các bóng đèn tạo nhiệt. Để có thể kiểm soát nhiệt độ gia nhiệt sử dụng cảm biến nhiệt độ, hiển thị nhiệt độ và thay đổi bằng đồng hồ điều khiển.

• Điều khiển cụm hóa chất:

- Động cơ khuấy hóa chất sử dụng Contactor để bật tắt động cơ.

- Bơm hoá chất vào bình chứa dùng bơm màng khí nén, sử dụng cảm biến tiệm cận để nhận biết giới hạn hóa chất trong bình (cạn, ☞

đầy) → điều khiển bơm bằng van điện từ khí nén đóng mở nguồn khí.

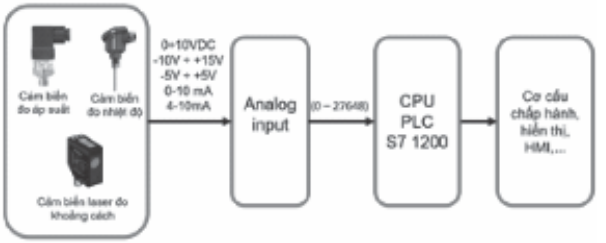
- Bơm hóa chất ra lựa chọn bơm bánh răng → để điều chỉnh lưu lượng của hóa chất → sử dụng biến tần để điều khiển tốc độ của động cơ.

- Điều khiển gia nhiệt hóa chất bằng dây mayso.

- Điều khiển súng phun PU: thông qua biến tần và sử dụng van điện từ khí nén để điều hướng hóa chất từ bơm - đầu phun hoặc hồi về bình.

b) Lựa chọn PLC

PLC S71200 1214C DC/DC/Relay của Siemens được lựa chọn để điều khiển đồng thời hai cụm băng tải và cụm phun hóa chất, hoạt động liên tục trong quá trình sản xuất. Việc mô phỏng bằng TIA Portal V17 có khả năng mô phỏng hệ thống điều khiển phun PU sử dụng PLC Siment bằng cách kết hợp PLC logic, HMI mô phỏng, và công cụ PLCSIM có thể xây dựng, kiểm tra và cải tiến chương trình điều khiển một cách an toàn, tiết kiệm và hiệu quả. Hình 4 mô tả quá trình xử lý tín hiệu từ cảm biến sang tín hiệu số và PLC thể hiện trên hình 4.



Hình 4. Mô hình xử lý tín hiệu từ cảm biến sang tín hiệu số và PLC

Trong PLC của Siemens, hai hàm NORM_X và SCALE_X được sử dụng để nhận và xuất dữ liệu của module analog mở rộng.

2.3. Mô phỏng với TIA PORTAL

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) là phần mềm của Siemens được sử dụng rộng rãi trong lập trình, cấu hình và mô phỏng hệ thống tự động hóa, đặc biệt là PLC, HMI và SCADA. Để mô phỏng hệ thống phun PU có điều khiển PLC, sử dụng ưu điểm mạnh của phần mềm là PLCSIM có thể mô phỏng chương trình PLC mà không cần phần cứng thực tế, cho phép kiểm tra logic điều khiển, gỡ lỗi, quan sát hoạt động trong thời gian thực. Giao diện tích hợp HMI mô phỏng để theo dõi và điều khiển trực quan, dễ dàng thiết kế các module tích hợp trong PLC [9-11] (Hình 5).



Hình 5. Màn hình giao diện thân thiện của TIA Portal V17

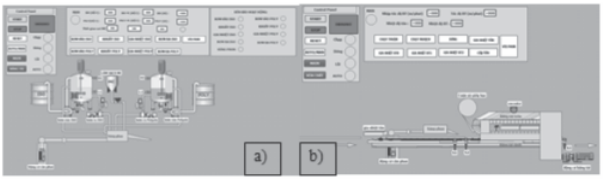
Sau khi đã mô phỏng và viết chương trình điều khiển cho PLC, ta nạp chương trình vào PLCSIM để mô phỏng chương trình chạy trên PLC và hệ thống mô phỏng.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG HỆ THỐNG PHUN PU

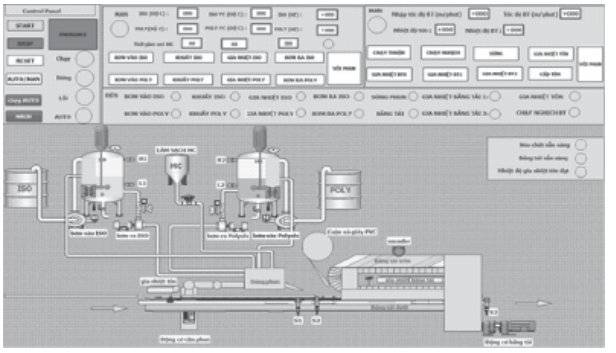
Chương trình mô phỏng trên TIA Portal đã đáp ứng được các yêu cầu cơ bản của hệ thống phun PU, thể hiện được các trạng thái của thiết bị và các chuyển động của hệ thống điều khiển được biểu diễn trên hình 6, hình 7 gồm:

- Hoạt động của các nút bấm, các hệ thống gia nhiệt;
- Chuyển động bơm vào, ra hóa chất từ bình chứa;
- Chuyển động quay của động cơ khuấy hóa chất;
- Hoạt động của các hệ thống gia nhiệt;
- Các chuyển động chạy của băng tải;
- Chuyển động phun, chuyển động chạy tôn;

- Sự thay đổi tín hiệu của các cảm biến, thông số hiển thị như: nhiệt độ hóa chất, nhiệt độ tôn, tốc độ chạy băng tải, nhiệt độ băng tải.



Hình 6. Màn hình mô phỏng điều khiển: a) Cụm băng tải; b) Cụm bơm hóa chất



Hình 7. Màn hình HMI mô phỏng điều khiển toàn bộ hệ thống phun PU

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đóng góp vào việc nâng cao hiệu suất và tính cạnh tranh của ngành công nghiệp sản xuất Tôn PU 5 sóng thông qua khả năng ứng dụng PLC hiện đại trong điều khiển dây chuyền. Giao diện mô phỏng trên TIA PORTAL thân thiện với người dùng, dễ quan sát toàn bộ các phần tử điều khiển cũng như hoạt động của cụm chi tiết, các loại cảm biến và giám sát hệ thống. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng việc sử dụng PLC trong quy trình sản xuất giảm thiểu lỗi sản xuất, tiết kiệm chi phí thiết bị và hóa chất thử nghiệm, kiểm tra phản ứng hệ thống đồng thời tối ưu hóa quy trình sản xuất.

Lời cảm ơn:

Tác giả chân thành cảm ơn sự hợp tác, hỗ trợ của Quý Công ty TNHH Công nghệ Công nghiệp Phú Sơn – Công ty sản xuất Panel, Tấm lợp và Tấm cách nhiệt mang thương hiệu JAVTA, INNOVA, SUMO theo tiêu chuẩn Châu Âu.❖

Ngày nhận bài: **02/05/2025**
Ngày phản biện: **20/05/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Caglayan, Cigdem, et al., "*Impact response of shear thickening fluid filled polyurethane foam core sandwich composites*". Composite Structures 243 (2020): 112171.
[2]. W Witkiewicz, A Zieliński, "*Properties of the polyurethane (PU) light foams*". Advances in Materials Science, 2006.
[3]. Catalogues – Công ty TNHH Công nghệ công nghiệp Phú Sơn.
[4]. Hoàng Minh Sơn, "*Cơ sở hệ thống điều khiển quá trình*". NXB. Bách Khoa, 2022.
[5]. PGS,TS. Trịnh Chất, TS. Trịnh Đồng Tính, "*Tự động hóa thiết kế cơ khí*", quyển 1, quyển 2. NXB. Bách Khoa.
[6]. Trần Văn Hiếu, "*Tự Động Hóa SIMATIC S7 – 1200 Với Tia Portal*". NXB. Khoa học & Kỹ thuật, 2021.
[7]. He, Huajin, Yinxin Long, and Wei Yu, "*Design and simulation of elevator emergency system based on TIA Portal V15. 1*". Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1802. No. 4. IOP Publishing, 2021.
[8]. Salih, Husam, Hammam Abdelwahab, and Areej Abdallah, "*Automation design for a syrup production line using Siemens PLC S7-1200 and TIA Portal software*". 2017 International conference on communication, control, computing and electronics engineering (ICCCCEE). IEEE, 2017.
[9]. Sobrino, Daynier Rolando Delgado, et al, "*Into the early steps of virtual commissioning in Tecnomatix plant simulation using S7-PLCSIM advanced and STEP 7 TIA portal*". MATEC web of conferences. Vol. 299. EDP Sciences, 2019.
[10]. Xu, Xingzhi, "*Research on Modeling and Simulation of Virtual Elevator System Based on TIA Portal*". Open Access Library Journal 11.10 (2024): 1-16.
[11]. Liam Bee, "*PLC and HMI Development with Siemens TIA Portal: Develop PLC and HMI programs using standard methods and structured approaches with TIA Portal V17*". Packt Publishing, 2022.

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÁY IN 3D – FDM TỐC ĐỘ CAO

DESIGN AND FABRICATION OF A HIGH-SPEED FUSED DEPOSITION MODELING (FDM) 3D PRINTER

Võ Ngọc Anh Tuấn*, Vũ Hoàng Thái Duy, Lê Trung Hòa
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh
**Email tác giả liên hệ: vnatuan@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về việc thiết kế và chế tạo máy in 3D – FDM tốc độ cao bằng hệ thống truyền động CoreXY và hệ thống điều khiển tối ưu tốc độ di chuyển của cụm đầu in trong không gian XY. Thiết kế nhằm tối ưu tốc độ và thời gian in khi sử dụng công nghệ in 3D trong quy trình tạo mẫu nhanh bằng nguyên lý bồi đắp vật liệu. Bài báo trình bày một cách cụ thể từ thiết kế cơ khí, điều khiển máy in 3D bằng hệ điều hành Raspberry Pi kiểm soát quá trình in bằng những thông số được căn chỉnh PID tự động và từ đó đem mẫu in đi kiểm nghiệm kích thước, chất lượng sản phẩm và độ bền kéo đối với từng loại nhựa. Bài báo sẽ dựa vào các nghiên cứu đã thực nghiệm để áp dụng hệ quả để nghiên cứu tìm ra những thông số in làm tăng chất lượng sản phẩm và tối ưu thời gian tạo mẫu với cơ cấu CoreXY để phát triển công nghệ tạo mẫu nhanh phục vụ trong học tập, cơ khí và y tế trong tương lai.

Từ khóa: *Máy in 3D FDM; Truyền động CoreXY; In mẫu 3D tốc độ cao.*

ABSTRACT

This paper presents the design and fabrication of a high-speed 3D printer based on Fused Deposition Modeling (FDM) technology, utilizing a CoreXY motion system and an optimized control mechanism to enhance the printhead's movement within the XY plane. The design is focused on maximizing printing speed and minimizing production time in the context of rapid prototyping using additive manufacturing principles. The paper details the complete development process, including mechanical design and the integration of a Raspberry Pi-based operating system for printer control. The control system employs auto-tuned PID parameters to regulate motion precision, ensuring consistent print quality. Printed samples are evaluated for dimensional accuracy, surface quality, and tensile strength across different thermoplastic materials. Based on experimental results, the study identifies optimal printing parameters that improve product quality and reduce prototyping time using the CoreXY architecture. The findings aim to contribute to the advancement of rapid prototyping applications in education, mechanical engineering, and medical fields.

Keywords: *FDM 3D Printer; CoreXY Motion System; High-Speed 3D Printing.*

1. GIỚI THIỆU

Máy in 3D là một công nghệ sản xuất tiên tiến dựa trên nguyên lý gia công cộng dồn vật liệu (Additive Manufacturing - AM), trong đó vật thể được tạo ra bằng cách xếp chồng từng lớp vật liệu theo mô hình thiết kế số. Công nghệ này đã phát triển mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực, từ công nghiệp, y tế, hàng không vũ trụ đến sản xuất sản phẩm tiêu dùng. Trong số các phương pháp in 3D hiện nay, Fused Filament Fabrication (FFF), còn được gọi là Fused Deposition Modeling (FDM), là một trong những công nghệ phổ biến nhất. Phương pháp này sử dụng sợi nhựa nhiệt dẻo như PLA, ABS, PETG... được nung chảy và đùn qua vòi phun để tạo thành vật thể theo từng lớp. Tuy nhiên, quá trình in 3D vẫn tồn tại nhiều thách thức như độ chính xác kích thước, chất lượng bề mặt, kiểm soát độ co rút vật liệu và đặc biệt là tối ưu hóa tốc độ in. Phương pháp AM đang thu hút được sự quan tâm mạnh mẽ trong môi trường học tập, khuôn đúc, y tế, các sản phẩm nghệ thuật. Các ứng dụng cũng đã nêu và cung cấp các ứng dụng mới đã được đề cập gần đây [1-6].

Hiện nay, các nghiên cứu đã phân tích động học cơ cấu CoreXY tối ưu tốc độ in lên hệ thống in 3D [7] nhưng để áp dụng vào thực nghiệm để thực hiện chế tạo và phát triển hệ thống điều khiển từ đó đi kiểm nghiệm mẫu in và kiểm bền từ đó đánh giá kết quả. Trong bài báo sẽ nêu rõ phần thiết kế cơ khí và các chức năng điều khiển làm tăng năng suất in và giảm sai số khi in bằng thuật toán PID bao gồm: nhiệt độ, cân bàn, khử rung cùng lúc đó giám sát quá trình in thông qua màn hình hoặc điện thoại thông minh khi kết nối cùng địa chỉ IP wifi phản hồi từ camera bằng hệ điều hành do Raspberry Pi tạo ra.

2. THIẾT KẾ HỆ THỐNG CƠ KHÍ

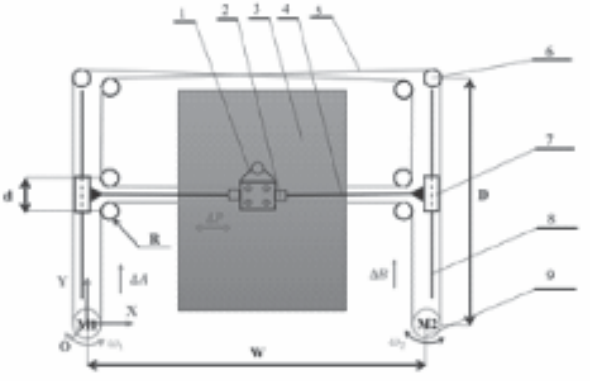
Quy trình thiết kế hệ thống cơ khí:

Bảng 1. Thông số thiết kế máy in 3D

Thông số	Giá trị
Kích thước máy	435 x 410 x 500 (mm)
Kích thước mẫu lớn nhất	200 x 200 x 200 (mm)
Vật liệu tạo mẫu	PLA, PETG, ABS...
Đường kính dây nhựa	1.75 mm
Số lượng đầu đùn	1 đầu đùn
Vận tốc đầu in khi đùn	V = 100-300 mm/s
Vận tốc khi chạy không tải	V = 300 mm/s

2.1. Cụm trục di chuyển XY

Cụm trục di chuyển XY là thành phần cấu tạo tạo chuyển động quan trọng nhất của đầu in trong mặt phẳng XY thì phải đảm bảo được các yếu tố sau: độ cứng vững, êm ái, đơn giản, tạo được gia tốc lớn khi in và giảm được gia tốc quán tính. Từ sơ đồ động của nguyên lý CoreXY phân tích động học cơ cấu như Hình 1 đưa ra mối tương quan giữa các đại lượng trong cơ cấu như sau:



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý CoreXY được áp dụng

Trong đó:

(1) Đầu in nhựa	(6) Pully dẫn hướng
(2) Con trượt vuông trục X	(7) Con trượt vuông trục Y
(3) Bàn gia nhiệt	(8) Thanh ray trục Y
(4) Thanh ray trục X	(9) Động cơ bước chủ động
(5) Dây đai răng GT2	

Phân tích động học cơ cấu CoreXY:

Độ dịch chuyển của đầu in phụ thuộc vào lượng dịch chuyển của dây đai theo công thức sau:

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{\Delta A + \Delta B}{2} \\ \Delta Y = \frac{\Delta A - \Delta B}{2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta A = \Delta X + \Delta Y \\ \Delta B = \Delta X - \Delta Y \end{cases} \quad (1)$$

Từ lượng dịch chuyển theo trục X và Y từ đó tìm được độ dịch chuyển được biểu diễn theo ma trận Jacobian (J).

$$\Delta p = R.J.\Delta\theta \quad (2)$$

$$\text{Với } J = \frac{1}{2}.\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}; \Delta\theta = \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

- J: Ma trận Jacobian là ma trận xác định chuyển động của pully tới vị trí đầu in;
- $\Delta\theta$: Góc quay của 2 động cơ bước dẫn động;
- R: Bán kính của pully đai được sử dụng.

Sau khi có lượng dịch chuyển thì lấy đạo hàm của lượng dịch chuyển đầu in theo thời gian sẽ có phương trình vận tốc của đầu in như sau:

$$v_p = \frac{dp}{dt} = R.J.\frac{d\theta}{dt} = R.J.\omega \quad (3)$$

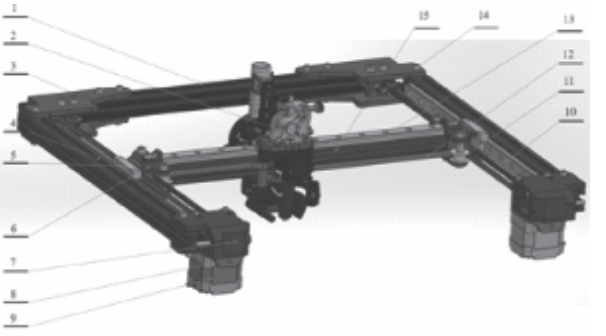
$$\text{Với, } \omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}$$

Trong đó: ω_1 và ω_2 là vận tốc góc của hai động cơ chủ động.

Motor dẫn động động cơ NEMA 17 42STH48-2504AC của LDO motors là động cơ được sử dụng rộng rãi máy in 3D với góc bước 1,8°. Tính toán độ dịch chuyển và vận tốc tối đa mà hệ thống CoreXY có thể đạt được như sau:

Số bước (bước/ vòng)	Góc quay (rad)	Độ dịch chuyển tối đa (mm)	Số vòng quay tối đa (RPM)	Thời gian (giây)
200	2π	37,7	477	1

Từ những tính toán và lựa chọn các chi tiết cơ khí thì được thiết kế như hình sau:



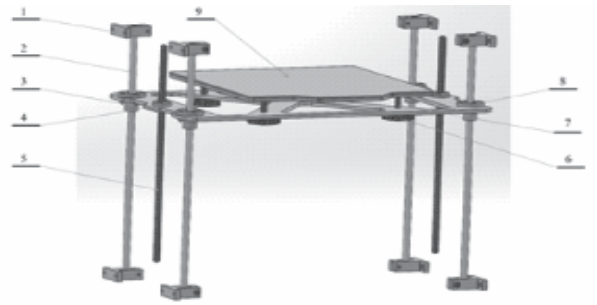
Hình 2. Thiết kế cụm XY

(1) Thanh nhôm gá pully dẫn hướng	(9) Động cơ dẫn động
(2) Cụm đầu in	(10) Thanh ray trục Y
(3) Gá pully dẫn hướng	(11) Pully không răng
(4) Thanh nhôm trục Y	(12) Đai răng GT2
(5) Con trượt vuông	(13) Thanh ray trục X
(6) Bộ gá thanh trục X	(14) Pully răng
(7) Bộ gá motor dẫn động	(15) Thanh nhôm trục X
(8) Tấm gá căng đai	

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

2.2. Cụm trục Z

Cụm Z được dùng để dịch chuyển bàn in theo trục Z cần phải độ chính xác của từng lớp in và chất lượng nên sử dụng truyền động vít me – đai ốc, bàn in và khung đỡ cần phải đảm bảo độ cứng vững thì được gia công CNC. Thiết kế cụm trục Z như hình:



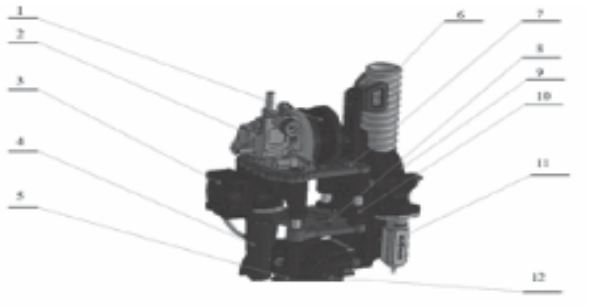
Hình 3. Thiết kế cụm bàn in Z

Trong đó:

(1) Động cơ tời nhựa	(7) Tấm trên gá đầu in
(2) Bộ tời nhựa	(8) Quạt lưu thông không khí
(3) Hoạt heatsink cho đầu in	(9) Tấm dưới gá đầu in
(4) Đầu in	(10) Tấm sau
(5) Dẫn không khí quạt làm mát nhựa	(11) Cảm biến cân bàn
(6) Ống dẫn dây điện	(12) Tấm gá cảm biến gia tốc

2.3. Cụm đầu in 3D

Cụm đầu in được sử dụng bộ tời nhựa trực tiếp được dẫn động bởi động cơ Nema14 36STH20-1004HG thông qua bộ truyền bánh răng để tăng moment khi đùn nhựa trực tiếp vào đầu gia nhiệt. Cụm đầu in được tích hợp thêm cảm biến cân bàn tự động Bltouch, công tắc hành trình trục X được thiết kế như hình:

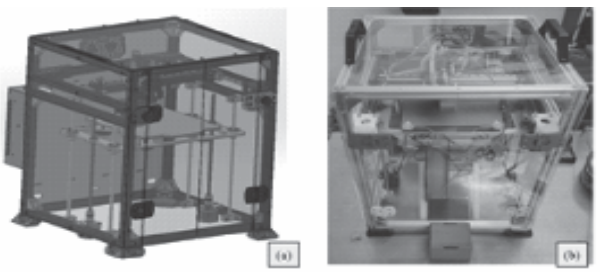


Hình 4. Thiết kế cụm đầu in của máy in 3D

Trong đó:

(1) Động cơ tời nhựa	(7) Tấm trên gá đầu in
(2) Bộ tời nhựa	(8) Quạt lưu thông không khí
(3) Hoạt heatsink cho đầu in	(9) Tấm dưới gá đầu in
(4) Đầu in	(10) Tấm sau
(5) Dẫn không khí quạt làm mát nhựa	(11) Cảm biến cân bàn
(6) Ống dẫn dây điện	(12) Tấm gá cảm biến gia tốc

Mô hình tổng thể của máy sau khi thiết kế trên phần mềm Solidworks và thực hiện và lắp ráp.



Hình 5. (a) Thiết kế trong phần mềm 3D, (b) Mô hình thực tế của máy khi chế tạo

3. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN

Công nghệ in 3D đang phát triển mạnh mẽ và đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp chế tạo, y tế và giáo dục. Trong ☞

đó, máy in 3D sử dụng cơ cấu CoreXY kết hợp với firmware Klipper mang lại khả năng điều khiển chính xác, tốc độ cao và tối ưu hóa chất lượng sản phẩm. Bài báo này tập trung nghiên cứu cấu trúc hệ thống điều khiển máy in 3D CoreXY sử dụng Klipper, làm rõ nguyên lý hoạt động của các thành phần chính và phân tích các thuật toán điều khiển tiên tiến.

Hệ thống điều khiển máy in 3D CoreXY bao gồm các thành phần chính sau:

•Raspberry Pi (Bộ điều khiển chủ - Host Controller):

- Thực hiện xử lý các thuật toán phức tạp như động học CoreXY, Input Shaping và Pressure Advance.
- Tiếp nhận và giải mã lệnh G-code từ người dùng thông qua giao diện web (Mainsail/ Fluidd).
- Gửi lệnh điều khiển qua cổng USB tới vi điều khiển chính (MCU).

•Mainboard MKS Robin Nano V3.1 (Vi điều khiển - MCU STM32F407):

- Tiếp nhận lệnh từ Raspberry Pi và thực thi điều khiển các thiết bị phần cứng.
- Điều khiển các động cơ bước (X, Y, Z, Extruder), bộ gia nhiệt (hotend, bàn nhiệt) và cảm biến (BLTouch, ADXL345).

4. KIỂM NGHIỆM

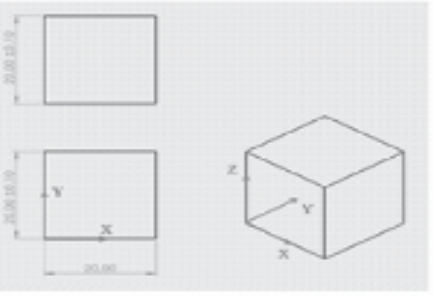
4.1. Kiểm nghiệm kích thước

Mẫu in kiểm tra kích thước như hình 6 có khối hình chữ nhật 20x20x20 mm và tốc độ di chuyển đầu in giữ trung bình cố định là 200 mm/s.

Độ lệnh kích thước được tính theo công thức sau theo ba phương X, Y, Z:

$$\Delta L_i = |\bar{L}_i - L_C|$$

- $\bar{L}_i$: Các giá trị trung bình đo trên mẫu theo phương $X\ (\bar{X}_i)$, $Y\ (\bar{Y}_i)$, $Z\ (\bar{Z}_i)$;
- L_C: Kích thước danh nghĩa trên mẫu thử;
- ΔL_i: Sai số tuyệt đối của mẫu thử so với kích thước danh nghĩa theo phương X, Y, Z;
- i: Số thứ tự của đối tượng đo.



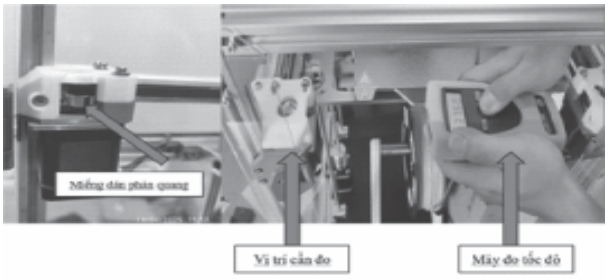
Hình 6. Mẫu in 3D để kiểm nghiệm sai số theo 3 phương X, Y, Z

Bảng 1. Kết quả sai số kích thước mẫu theo 3 phương X, Y, Z

Loại nhựa	Miền dung sai phương X (mm)	Miền dung sai phương Y (mm)	Miền dung sai phương Z (mm)
PETG	20 ± 0,054	20 ± 0,023	20 ± 0,147
PLA	20 ± 0,06	20 ± 0,017	20 ± 0,121

4.2. Kiểm nghiệm tốc độ

Phương pháp đo vận tốc bằng quang học sử dụng ánh sáng (laser hoặc LED) và cảm biến ảnh để thu tín hiệu phản hồi từ bề mặt vật thể mà không cần tiếp xúc. Thông qua phân tích biến đổi cường độ, tần số Doppler hoặc vị trí bóng sáng trên cảm biến, hệ thống cho biết chính xác vận tốc, khoảng cách hay độ dày. Kỹ thuật này mang lại kết quả nhanh, chính xác và an toàn và được thực hiện như hình 7.



Hình 7. Quy trình đo tốc độ quay của động cơ thực tế

Bảng 2. Bảng kết quả đo tốc độ của động cơ từ máy đo tốc độ quang học.

Tốc độ đầu in thiết lập trên phần mềm (mm/s)	Tốc độ vòng quay theo tính toán (RPM)	Tốc độ đầu in di chuyển đầu in theo thực tế (mm/ s)	Tốc độ vòng quay theo thực tế (RPM)
25	37,5	25,49	38,24
50	75	49,65	74,47
100	150	99,93	149,9
120	180	120,27	180,4
170	255	167,4	251,1
200	300	199,6	299,4
250	375	238,6	357,9
300	450	286,2	429,3
350	525	365,93	548,9

Bảng 3. Bảng kết quả đo tốc độ cấp liệu của động cơ từ máy đo tốc độ quang học.

Tốc độ thiết lập trên phần mềm (mm/ s)	Tốc độ vòng quay theo tính toán (RPM)	Tốc độ cấp liệu đầu in theo thực tế (mm/ s)	Tốc độ vòng quay cấp liệu theo thực tế (RPM)
10	101,63	10,44	106,128
15	152,45	15,81	160,644
20	203,26	21,17	215,116
25	254,08	26,73	271,612
30	304,89	31,79	323,048

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chế tạo thành công máy in 3D đạt tốc độ đầu in 350 mm/s, vượt mục tiêu với kết quả thực tế 365,93 mm/s. Sai số giữa tốc độ thiết lập và đo được dưới 5% ở hầu hết dải tốc độ, chứng tỏ hệ thống điều khiển và cơ cấu truyền động ổn định. Tuy nhiên, tại tốc độ tối đa, sai số dương +4,5% cho thấy cần tối ưu quán tính cơ học và khả năng tản nhiệt. Kết quả mở ra tiềm năng ứng dụng công nghiệp, đồng thời đề xuất cải tiến thuật toán điều khiển và vật liệu để nâng cao độ ổn định ở tốc độ siêu cao.❖

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (HCMUT – VNU-HCM) đã tài trợ và tạo điều kiện thuận lợi để thực hiện đề tài theo mã số SVTC-2024-CK-111.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**
Ngày phản biện: **21/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ali Kamrani, Emad Abouel Nar (2006), "*Rapid prototyping: Theory and practice*". Springer.

[2]. Gideon N. Levy, Ralf Schindel, J.P. Kruth (2003), "*Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives*". CIRP Annals - Manufacturing Technology.

[3]. Trần Ngọc Hiền, Trần Ngọc Tú (2012), "*Tích hợp kỹ thuật thiết kế ngược và công nghệ tạo mẫu nhanh trong chế tạo cơ khí*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng.

[4]. "*Thiết kế chế tạo máy in chi tiết nhựa 3D*". Bộ môn Cơ khí chính xác và Quang học, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

[5]. Nguyễn Thanh Hải, "*Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ và quỹ đạo đầu đùn đến chất lượng sản phẩm trong quá trình FDM (Fused Deposition Modeling)*". Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh, 2013.

[6]. Pham, D. and Gault, "*A comparisons of Rapid prototyping technologies*". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998.

ĐÁNH GIÁ ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA PANME ĐẦU ĐO CHỮ V THÔNG QUA SO SÁNH VỚI MÁY ĐO TỌA ĐỘ

EVALUATION OF V-ANVIL MICROMETER ACCURACY VIA COMPARISON WITH A COORDINATE MEASURING MACHINE

Nguyễn Thành Trung
Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: trung.nguyenthanh2@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này phân tích độ chính xác khi sử dụng panme đầu đo chữ V để đo đường kính ngoài của các chi tiết có bề mặt gián đoạn với số cạnh lẻ, như đường kính ngoài then hoa, bánh răng, mũi taro hoặc dao phay ngón. Trong các trường hợp số cạnh lẻ này, panme thông thường với hai tiếp điểm không thể đảm bảo độ chính xác do không thể tiếp xúc đúng trên bề mặt đo. Ngược lại, panme đầu đo chữ V tiếp xúc tại ba vị trí, bao gồm hai mặt chữ V và đầu đo động, tạo khả năng tự định tâm tốt nhưng phụ thuộc nhiều vào kỹ năng thao tác người đo. Kết quả đo được so sánh với máy đo tọa độ (CMM), sử dụng cả bốn thuật toán xác định đường tròn: bình phương tối thiểu (LSC), ngoại tiếp nhỏ nhất (MCC), nội tiếp lớn nhất (MIC) và miền tối thiểu (MZC). Kết quả so sánh cho thấy panme đầu đo chữ V có xu hướng cho kết quả bằng hoặc lớn hơn nhiều nhất tới 0,03 mm so với CMM, trong đó sai lệch đáng kể nhất xuất hiện khi đối chiếu với kết quả theo thuật toán đường tròn nội tiếp lớn nhất.

Từ khóa: *Panme đầu đo chữ V; Bề mặt gián đoạn; Độ chính xác; Lực đo; Máy đo tọa độ.*

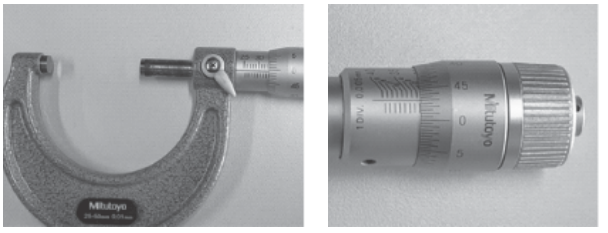
ABSTRACT

This work investigates measurement accuracy when using a V-anvil micrometer to determine the outer diameter of features with uneven lobes or teeth, such as splines, gears, taps, or multi-flute end mills. Conventional micrometers with two contact points are unsuitable for such geometries due to insufficient surface engagement, which can result in significant measurement errors. In contrast, a V-anvil micrometer provides three-point contact, two at the V-anvils and one at the spindle. However, the accuracy of the measurement remains highly dependent on the operator's ability to align the micrometer correctly. Measurement results were compared with those obtained from a coordinate measuring machine (CMM) using four common standard evaluation algorithms: Least squares circle (LSC), Minimum circumscribed circle (MCC), Maximum inscribed circle (MIC), and Minimum zone circle (MZC). The comparison results show that the micrometer produces values equal to or greater than 0.03 mm compared to those of the CMM, with the greatest deviation observed when using MIC algorithm.

Keywords: *V-anvil micrometer; Discontinuous surface; Accuracy; Measuring force; Coordinate Measuring Machine.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong lĩnh vực đo lường cơ khí chính xác, panme là một trong những dụng cụ đo cơ bản và phổ biến nhất, được sử dụng rộng rãi tại các nhà máy, xưởng gia công cơ khí hoặc trong phòng kiểm tra chất lượng. Thiết bị này hoạt động dựa trên nguyên lý chuyển động tịnh tiến của đầu đo động, thông qua sự ăn khớp giữa cơ cấu ren và đai ốc [1]. Thiết kế truyền thống của panme sử dụng hệ thống chia vạch cơ khí trên du xích để đọc kết quả, cho phép đạt được độ phân giải lên đến 0,01 mm, 0,005 mm hoặc thậm chí 0,001 mm. Độ phân giải của panme cơ khí được xác định bằng tỷ số giữa bước ren của trục vít và số lượng vạch chia trên du xích. Ví dụ, đối với panme có bước ren 0,5 mm và du xích gồm 50 vạch chia, độ phân giải đạt được là 0,01 mm (Hình 1a). Khi số vạch chia tăng lên 100 (Hình 1b), độ phân giải được cải thiện, đạt mức 0,005 mm. Nguyên lý này cũng có thể áp dụng với các loại panme có bước ren khác như 0,25 mm (loại bước mịn) hoặc 1 mm (loại bước thô), giúp mở rộng dải ứng dụng tùy theo yêu cầu đo cụ thể.



(a) *(b)*

Hình 1. Cách chia vạch trên panme có bước đầu đo động 0,5 mm và số lượng vạch chia trên du xích: a) 50 vạch, b) 100 vạch

Tuy nhiên, panme hai tiếp điểm thông thường chỉ hoạt động hiệu quả khi đo các chi tiết có mặt ngoài tròn đều hoặc gián đoạn có số cạnh chẵn. Khi gặp các chi tiết có tiết diện biên dạng gián đoạn có số cạnh lẻ như trục then hoa, bánh răng, dao phay hay mũi taro, việc xác định đường kính ngoài bằng hai điểm tiếp xúc là không khả thi [2]. Để khắc phục hạn chế này, nhiều hãng thiết bị đo đã phát triển loại panme đầu đo chữ V (V-anvil micrometer) với ba điểm tiếp xúc, trong đó hai điểm tạo bởi rãnh chữ V cố định và một điểm còn lại từ đầu đo động. Thiết kế này giúp đảm bảo khả năng tự định tâm tốt hơn và thiết lập các vị trí tiếp xúc đúng vào bề mặt cần đo đối với các chi tiết có số cạnh lẻ.

Panme đầu đo chữ V hiện được sử dụng rộng rãi trong các xưởng sản xuất nhằm kiểm tra nhanh kích thước hoặc độ mòn của dụng cụ cắt, đặc biệt trong các trường hợp không có sẵn thiết bị đo cao cấp như máy đo tọa độ ba chiều (CMM) [3, 4]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng độ chính xác của panme chữ V có thể bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như: sai số chế tạo tại góc chữ V, hình dạng đầu đo động, vị trí tiếp xúc thực tế, lực đo tác động, cũng như kỹ năng thao tác của người vận hành [5].

Mặc dù các tiêu chuẩn như ISO [2, 6] đã đưa ra các yêu cầu về độ chính xác cho dụng cụ đo cơ khí, nhưng các nghiên cứu so sánh trực tiếp giữa panme đầu đo chữ V và CMM trong điều kiện đo các bề mặt gián đoạn vẫn còn ít được công bố. Trong bối cảnh này, việc đối chiếu kết quả đo của panme chữ V với CMM là cần thiết để đánh giá độ tin cậy và phạm vi sử dụng phù hợp của thiết bị. Do vậy, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá sai lệch của panme đầu đo chữ V khi đo bánh răng có số răng lẻ, thông qua so sánh với kết quả đo bằng máy CMM theo các thuật toán xử lý dữ liệu hình học đã được tích hợp trong phần mềm thương mại.

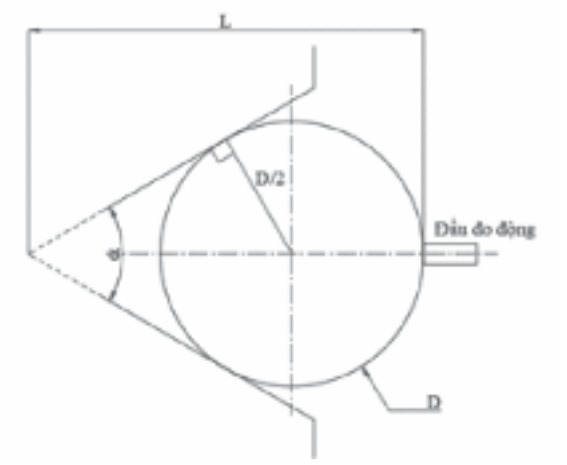
2. NGUYÊN LÝ ĐO CỦA PANME ĐẦU ĐO CHỮ V

Nguyên lý đo đường kính theo phương ☞

pháp ba tiếp điểm được minh họa trong hình 2. Khác với phương pháp hai tiếp điểm, khi lượng dịch chuyển của đầu đo động chính là đường kính cần đo, panme đầu đo chữ V đo đường kính thông qua sự dịch chuyển của đầu đo ứng với chiều dài L, được tính theo công thức sau [7]:

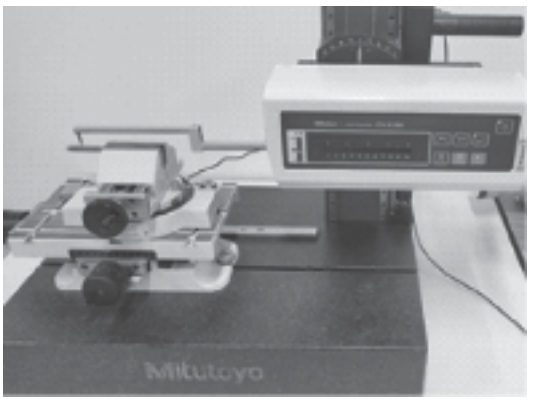
$$L = \frac{D}{2}\left(1 + \frac{1}{\sin(\frac{\alpha}{2})}\right) \quad (1)$$

Trong đó, D là đường kính cần đo, α là góc giữa hai mặt của rãnh V.

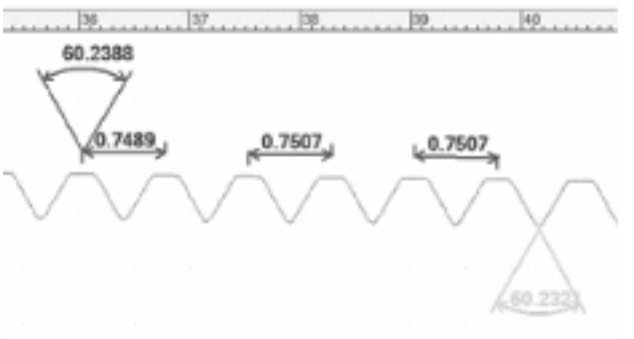


Hình 2. Nguyên lý hình học của phương pháp đo ba tiếp điểm bằng panme đầu đo chữ V.

Với góc α = 60°, ta có L = 1,5D, nghĩa là đầu đo phải dịch chuyển 1,5 mm để đo được 1 mm đường kính thực. Do đó, bước ren của trục vít trong panme được chế tạo là 0,75 mm thay vì 0,5 mm như panme thông thường. Điều này được kiểm chứng thực nghiệm khi tiến hành đo bước ren của đầu đo động panme bằng máy đo biên dạng Contracer CV-2100 của hãng Mitutoyo, như thể hiện trong hình 3. Kết quả hiển thị trên phần mềm cho thấy bước ren là xấp xỉ 0,75 mm, phù hợp với sự tính toán ở trên. Ngoài ra, hình 4 minh họa khoảng cách thực tế giữa các vạch khắc trên thang chia chính của panme. Với dải đo từ 85 mm đến 100 mm của panme Mitutoyo 114-107, khoảng cách thực tế đo được là 22,5 mm, xác nhận tỷ lệ khuếch đại 1,5 lần của phương pháp đo ba tiếp điểm.

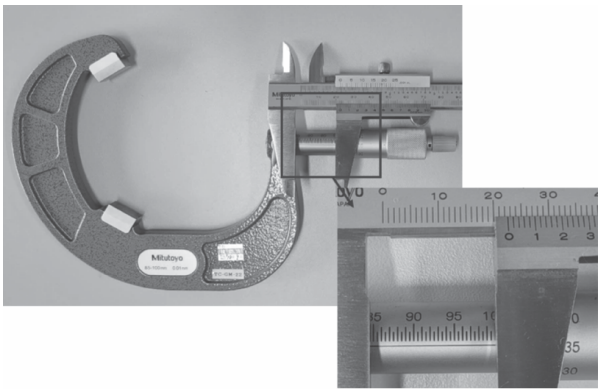


(a)



(b)

Hình 3. (a) Trục ren của đầu đo panme được gá trên máy đo biên dạng và (b) Kết quả đo bước ren và góc profin ren trên phần mềm của máy đo biên dạng.



Hình 4. Cách chia vạch trên thang chia chính của panme - khoảng cách thực tế từ vạch 85 đến 100 có giá trị 22,5 mm.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng khi đo đường kính của các bề mặt gián đoạn có số cạnh lẻ, việc lựa chọn góc chữ V của panme phải phù hợp với hình học của chi tiết để đảm bảo tiếp xúc đúng và định tâm chính xác. Với n là số cạnh của chi tiết cần đo, góc chữ V ký hiệu là α được xác định theo công thức sau [8], nhằm đảm bảo ba cạnh của chi tiết tiếp xúc chính xác tại hai mặt rãnh chữ V cố định và đầu đo động của panme:

$$\alpha = 180^o - \frac{360^o}{n} \quad (2)$$

Bên cạnh đó, trong thực tế, nên ưu tiên lựa chọn các giá trị góc chữ V theo tiêu chuẩn thông dụng để thuận tiện khi chọn mua hoặc chế tạo panme. Đối với các chi tiết có số cạnh n lớn và chia hết cho 3, có thể áp dụng quy tắc rút gọn để sử dụng lại các góc tiêu chuẩn. Một số ví dụ minh họa được trình bày trong Bảng 1 dưới đây:

Bảng 1. Lựa chọn góc V của panme theo số cạnh của bề mặt đo.

Số cạnh của mặt đo n	3	5	7	9	15	21	27
Góc V (°)	60	108	128 (hoặc 120, 135)	60	60	60	60

3. KẾT QUẢ ĐO SO SÁNH VỚI MÁY ĐO TỌA ĐỘ

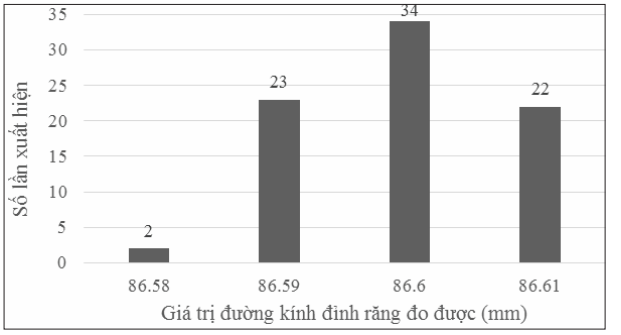
Bề mặt gián đoạn được sử dụng trong nghiên cứu là một bánh răng có số răng z = 27 và mô đun m = 3 mm. Đường kính đỉnh răng của bánh răng này được đo bằng cả panme đầu đo chữ V Mitutoyo 114-107 và máy đo tọa độ Mitutoyo Crysta-Apex S544, như minh họa trong Hình 5. Để đánh giá độ lặp lại của phép đo trên panme, bánh răng được đo 81 lần, mỗi lần dịch tiến một răng, do đó quá trình đo bao phủ ba vòng răng liên tiếp.



(a) *(b)*

Hình 5. Bánh răng có z = 27, m = 3 được đo trên: (a) Panme đầu đo chữ V, (b) Máy đo tọa độ Mitutoyo Crysta-Apex S544.

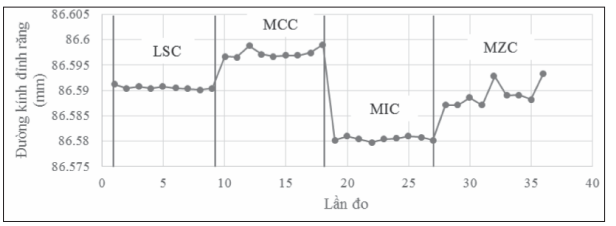
Trên máy đo tọa độ CMM, phép đo được thực hiện 9 lần bằng chế độ tự động. Mỗi lần, máy thu thập 27 điểm đo tại đỉnh các răng, với vị trí bắt đầu đo giữa hai lần đo liên tiếp cách nhau 3 răng. Quy trình đo này được lặp lại cho cả bốn thuật toán xử lý dữ liệu khác nhau. Kết quả đo bằng panme được trình bày trong hình 6, trong khi kết quả đo của CMM được thể hiện ở hình 7.



Hình 6. Kết quả đo đường kính đỉnh răng (z = 27, m = 3) bằng panme đầu đo chữ V.

Quan sát Hình 7 cho thấy giá trị đường kính đỉnh răng đo được bằng CMM khá ổn định khi sử dụng các thuật toán LSC, MCC và MIC, trong khi thuật toán MZC có sự dao động nhẹ, lên đến 0,0062 mm. Hơn nữa, đối với cùng một bánh răng, kết quả đo đường kính đỉnh răng đạt giá trị lớn nhất khi sử dụng thuật toán MCC, ☞

nhỏ nhất với thuật toán MIC, và gần với giá trị trung bình khi sử dụng LSC và MZC. Sự khác biệt này là phù hợp với định nghĩa trong tiêu chuẩn ISO về bốn phương pháp xác định đường tròn tham chiếu khi đo trên CMM, cũng như các tài liệu tham khảo khác [9-11].



Hình 7. Kết quả đo đường kính đỉnh răng bằng CMM. Lần đo 1-9 sử dụng thuật toán LSC, 10-18: MCC, 19-27: MIC, 28-36: MZC.

Sự chênh lệch lớn nhất giữa 36 lần đo bằng CMM là 0,0193 mm, và chủ yếu xuất phát từ sự khác nhau trong thuật toán xử lý dữ liệu. Trong khi đó, kết quả đo bằng panme đầu đo chữ V có độ chênh lệch lớn hơn, lên đến 0,03 mm. Nguyên nhân chính là do sự sai lệch tại các vị trí tiếp xúc giữa panme và bánh răng đo. Các vị trí tiếp xúc này không phải là điểm mà là các đường tiếp xúc, nên dù panme có lực đo giới hạn trong khoảng 5 đến 10 N khi dùng cơ cấu bánh cóc [3], kết quả đo vẫn phụ thuộc nhiều vào kỹ năng và thao tác của người sử dụng để lựa chọn vị trí tiếp xúc phù hợp nhằm đạt được kết quả chính xác.

4. KẾT LUẬN

Kết quả của 81 lần đo đường kính đỉnh răng của bánh răng 27 răng thực hiện bằng panme đầu đo chữ V cho thấy giá trị trung bình đạt 86,5995 mm với độ lệch chuẩn 0,0081 mm. Khi so sánh với kết quả đo bằng máy đo tọa độ CMM, sử dụng bốn thuật toán xử lý dữ liệu đường tròn phổ biến, giá trị trung bình thu được là 86,5894 mm với độ lệch chuẩn 0,0062 mm. Sự sai lệch giữa hai phương pháp là rất nhỏ và hoàn toàn chấp nhận được trong các ứng dụng đo kiểm thông thường.

Điều này cho thấy rằng, mặc dù chỉ là một dụng cụ cơ khí đơn giản, nhưng panme đầu đo chữ V vẫn có thể được sử dụng để đo các bề mặt gián đoạn có số cạnh lẻ, như đường kính đỉnh răng của bánh răng hoặc dao phay ngón, với độ chính xác tương đương so với thiết bị CMM chuyên dụng. Trong khi CMM là thiết bị đắt tiền, yêu cầu điều kiện môi trường nghiêm ngặt (nhiệt độ, độ ẩm, rung động) và thường chỉ được sử dụng trong phòng đo chuẩn, thì panme đầu đo chữ V lại có ưu điểm lớn: dễ vận hành, đo trực tiếp tại hiện trường, ít chịu ảnh hưởng bởi môi trường xung quanh, và đặc biệt phù hợp với các nhà máy nhỏ không có điều kiện đầu tư thiết bị đo cao cấp. Tuy nhiên, để đảm bảo độ chính xác, kỹ năng và kinh nghiệm của người vận hành panme vẫn đóng vai trò rất quan trọng.❖

Ngày nhận bài: **08/5/2025**
Ngày phản biện: **26/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Francis T. Farago, Mark A. Curtis (1994), "*Handbook of Dimensional Measurement*", Third Edition. Industrial Press Inc. Pages. 23-26.

[2]. Tiêu chuẩn ISO 3611:2023(E): "*Geometrical product specifications (GPS) - Dimensional measuring equipment - Design and metrological characteristics of micrometers for external measurements*".

[3]. https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/01.02.01.075/3%20Flute%20V-Anvil%20Micrometer/$catalogue/mitutoyoData/PR/114-107/index.xhtml.

[4]. Heinrich Schwenke, Ulrich Neuschaefer-Rube, Tilo Pfeifer, Horst Kunzmann, "*Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering*". CIRP Annals,

Volume 51, Issue 2, 2002, Pages 685-699.
[5]. Sangeeta Pandit, Neel. P. Padia. Chapter: Ergonomic Design Analysis of Analogue Micrometer Screw Gauge. (2023) "*Sustainable Material, Design, and Process*". Taylor & Francis Group.
[6]. Tiêu chuẩn ISO 14253-1:2017, "*Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment*".
[7]. Nguyễn Tiến Thọ, Nguyễn Thị Xuân Bảy, Nguyễn Thị Cẩm Tú (2007), "*Kỹ thuật đo lường và kiểm tra trong chế tạo cơ khí*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật, trang 18.
[8]. Nguyễn Tiến Thọ, Nguyễn Thị Xuân Bảy, Nguyễn Thị Cẩm Tú (2007), "*Kỹ thuật đo lường và kiểm tra trong chế tạo cơ khí*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật, trang 71.
[9]. ISO 12181-1:2011(E), "*Geometrical product specifications (GPS) – Roundness, Part 1: Vocabulary and parameters of roundness*".
[10]. Nguyễn Thành Trung, Vũ Toàn Thắng, Vũ Tiến Dũng, "*Sử dụng phương pháp tối ưu giải bài toán đánh giá sai lệch độ trụ từ bộ dữ liệu điểm đo*". Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, số 72(8), 2021, trang 982-993.
[11]. Qingze He, Peng Zheng, Xingchen Lv, Jicun Li, Yan Li, "*A new method for evaluating roundness error based on improved bat algorithm*". Measurement, Volume 238, 2024, 115314.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA SẢN PHẨM GREEN PART TRONG CÔNG NGHỆ IN 3D KIM LOẠI THEO PHƯƠNG PHÁP EXTRUSION-BASED ADDITIVE

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE ACCURACY OF GREENPART PRODUCTS IN METAL 3D PRINTING USING EXTRUSION-BASED ADDITIVE MANUFACTURING

Bùi Trọng Hiếu, Trần Thị Kiều My, Huỳnh Hữu Nghị*
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh
**Email: hhnghi@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Công nghệ in 3D kim loại theo phương pháp đùn vật liệu (MFE) đang ngày càng được quan tâm nhờ khả năng tạo ra chi tiết phức tạp với chi phí tối ưu. Tuy nhiên, thách thức lớn của công nghệ này là kiểm soát độ chính xác kích thước sản phẩm qua từng giai đoạn, đặc biệt là ở trạng thái Green Part. Nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng và tối ưu hóa các thông số in đến độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part để nâng cao chất lượng tổng thể. Năm thông số công nghệ được khảo sát bao gồm bề dày lớp in (LH), tốc độ in (PS), nhiệt độ in (PT), số lớp vỏ (NS) và hướng chế tạo (BO), với ba mức giá trị cho mỗi thông số. Kết quả thí nghiệm từ thiết kế FCCCD với 29 mẫu cho thấy LH và PS ảnh hưởng mạnh nhất đến sai số theo phương X và Y, trong khi phương Z bị chi phối bởi các tương tác phi tuyến như LH×LH và PT×NS. Mô hình hồi quy có độ phù hợp cao với R^2 trên 87,00%. Sai số kích thước lớn nhất ghi nhận theo phương X, Y là 2,8% và phương Z là 1,2%, chủ yếu do các hiệu ứng tích lũy giữa các lớp in và tương tác thông số. Tối ưu hóa đa mục tiêu chỉ ra bộ thông số tối ưu chung cho ba phương là LH = 0,2 mm, PS = 30 mm/s, PT = 210°C, NS = 1 và BO = 0°. Kết quả nghiên cứu đề xuất một quy trình tối ưu hóa đáng tin cậy và làm cơ sở cho việc tiếp tục đánh giá mối liên hệ giữa Green Part và Final Part trong tương lai.

Từ khóa: *MFE; Green Part; Cu/PLA; Tối ưu hóa; ANOVA.*

ABSTRACT

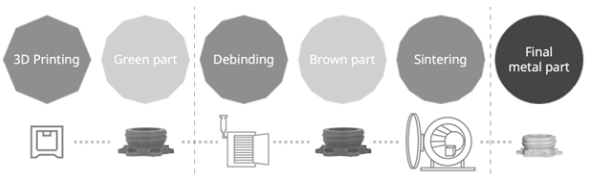
Metal 3D printing using the Material Extrusion (MFE) method is increasingly gaining attention due to its ability to fabricate complex parts at an optimized cost. However, a major challenge of this technology lies in controlling the dimensional accuracy of the product throughout each stage, especially in the Green Part state. This study aims to evaluate and optimize the effects of printing parameters on the dimensional accuracy of the Green Part to enhance overall quality. Five process parameters are investigated, including layer height (LH), print speed (PS), printing temperature (PT), number of shells (NS), and build orientation (BO), each with three

levels. Experimental results based on a Face-Centered Central Composite Design (FCCCD) with 29 runs show that LH and PS have the most significant influence on dimensional error in the X and Y directions, while the Z direction is predominantly affected by nonlinear interactions such as LH×LH and PT×NS. The regression models exhibit high goodness-of-fit with R^2 values above 87.00%. The maximum recorded dimensional errors were 2,8% in the X and Y directions, and 1,2% in the Z direction, mainly due to accumulated errors between layers and parameter interactions. Multi-objective optimization identified an optimal parameter set for all three directions: LH = 0.2 mm, PS = 30 mm/s, PT = 210°C, NS = 1, and BO = 0°. The study proposes a reliable optimization procedure and provides a foundation for further investigation into the relationship between the Green Part and Final Part in future work.

Keywords: *MFE; Green Part; Cu/PLA; Optimization; ANOVA.*

1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Công nghệ in 3D bằng phương pháp đùn vật liệu (Material Extrusion) – Metal Filament Extrusion (MFE) đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất và nghiên cứu khoa học nhờ khả năng chế tạo các chi tiết phức tạp với chi phí tối ưu. Trong số các vật liệu đang trong giai đoạn nghiên cứu, đồng là một trong những vật liệu dễ bắt đầu nhất [1]. Hơn thế nữa, đồng được biết đến với tính linh hoạt cao, nhờ đó vật liệu này ngày càng thu hút sự quan tâm trong cộng đồng in 3D nhờ sự kết hợp tuyệt vời giữa độ dẫn điện, nhiệt cao, độ bền cơ học tốt và khả năng chống ăn mòn. Vật liệu này hứa hẹn sẽ mang đến một cuộc cách mạng hóa về các ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp khác nhau, đặc biệt trong ba lĩnh vực chính là linh kiện điện tử, hệ thống quản lý nhiệt và hàng không vũ trụ [2]. Tuy nhiên, một trong những thách thức lớn khi sử dụng loại vật liệu nhựa pha kim loại này nói chung và vật liệu (Cu/PLA) nói riêng là khả năng kiểm soát chất lượng sản phẩm. Vòng đời sản phẩm của phương pháp MFE trải qua ba trạng thái chính: Green Part – Brown Part – Final Part tương ứng với các giai đoạn: In 3D – Loại bỏ chất kết dính – Thiêu kết trong lò.



Hình 1. Tên gọi các sản phẩm ở các giai đoạn [3]

Qua quá trình loại bỏ chất kết dính và thiêu kết, sản phẩm cuối cùng bị co rút theo mọi phương làm giảm kích thước đáng kể so với sản phẩm Green Part ban đầu [2]. Điều này chứng tỏ rằng việc kiểm soát độ chính xác kích thước sản phẩm qua từng giai đoạn là hết sức cần thiết.

Buj-Corral, I. và các cộng sự [4] đã nghiên cứu về độ chính xác kích thước và độ xốp của các bộ phận in 3D từ sợi nhựa Cu/PLA trong đó chứa khoảng 35% đồng theo khối lượng. Kết quả cho thấy, độ chính xác kích thước của các chi tiết in phụ thuộc nhiều vào chiều cao lớp và nhiệt độ in đối với phương X, Y, trong khi phương Z bị ảnh hưởng bởi tốc độ in và tương tác giữa chiều cao lớp với tốc độ in. Mahros Darsin và các cộng sự [5] tập trung vào độ chính xác kích thước, phát hiện rằng nhiệt độ vòi phun 220°C, chiều cao lớp 0,3 mm và đường điền đầy dạng đường mang lại độ chính xác kích thước tốt nhất. Ajjarapu, K. P. K. [2] ☞

đã chỉ ra rằng sai lệch kích thước theo phương X, Y có thể lên đến 6,6% và với phương Z con số này vào khoảng 2%, nghiên cứu còn chỉ ra rằng việc sai lệch kích thước có thể ảnh hưởng đến tính lắp ghép, độ bền cơ học và các đặc tính vật lý khác của sản phẩm, làm giảm chất lượng và hiệu suất in. Do đó, việc nghiên cứu và tối ưu hóa các thông số in để nâng cao độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part là một nội dung không thể thiếu trong phương pháp MFE.

Mặc dù nhiều nghiên cứu đã xem xét ảnh hưởng của thông số in 3D đến tính chất cơ học và độ chính xác kích thước của sản phẩm Cu/PLA, nhưng mối quan hệ giữa Green Part và sản phẩm sau thiêu kết vẫn chưa được làm rõ. Hầu như chưa có nghiên cứu nào đề cập đến sự thay đổi kích thước, co ngót, biến dạng sau thiêu kết dựa trên thông số in ban đầu. Việc hiểu rõ mối liên hệ này sẽ giúp tối ưu hóa quy trình sản xuất, đảm bảo chất lượng và nâng cao ứng dụng của công nghệ in 3D kim loại MFE với vật liệu nhựa pha kim loại nói chung và vật liệu Cu/PLA nói riêng.

Nghiên cứu này sẽ giải quyết các nội dung nêu trên bằng cách xét đến 3 mức độ ảnh hưởng của 5 thông số công nghệ ảnh hưởng đến chất lượng của sản phẩm Green Part. Hơn thế nữa, mối liên hệ về độ co rút của Green Part và Final Part sẽ được làm rõ, từ đó đặt ra yêu cầu cho sản phẩm Green Part.

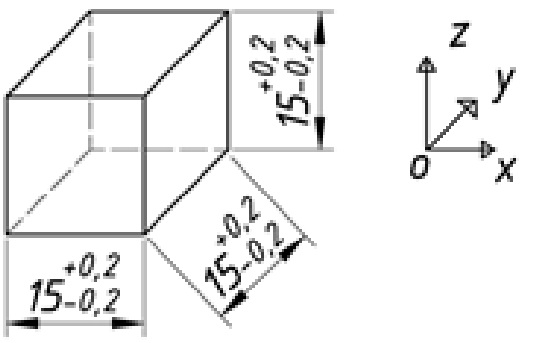
2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và lựa chọn mẫu thực nghiệm

Máy in được sử dụng trong nghiên cứu thuộc dạng máy in 3D FDM được đặt tại PTN CAD/CAM, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG – HCM. Vật liệu được sử dụng trong nghiên cứu này là sợi nhựa pha kim loại Cu/PLA (Copper Filament™) với đường kính 1,75 mm và chứa 87 ÷ 90 % khối lượng đồng. Vật liệu được nhập từ nhà cung ứng Virtual Foundry™ [1].

Dựa trên tiêu chuẩn AS/ISO/ASTM 52902:2021 [6] và các bài báo liên quan, mẫu thử dạng lập phương được chọn để tiến hành thực nghiệm. Như đã đề cập ở Mục 1, tại đây yêu cầu kỹ thuật cho sản phẩm Green Part dựa vào các đặc điểm co rút của vật liệu sẽ được đề cập. Theo hướng dẫn của The Virtual Foundry™ [1], đối với vật liệu Cu/PLA sau khi thiêu kết, kích thước co rút khoảng 7 ÷ 10%. Nghiên cứu này chọn giá trị co rút là δ = 10%. Với kích thước Final Part được chọn là 13,5 × 13,5 × 13,5 mm thì mẫu thực nghiệm sẽ có kích thước 15 × 15 × 15 mm (dung sai ±0,2 mm cho mỗi cạnh). Việc lựa chọn dung sai dựa trên sự kết hợp của tiêu chuẩn ISO 2768 – 1 [7] và dung sai cho phép của máy in 3D thông thường là ±0,2 mm.

Mẫu có các thông số cố định như cách điền đầy dạng đường, tỉ lệ điền đầy là 30% và đường kính vòi phun là 0,6 mm. Các mẫu được in từng mẫu một độc lập với nhau và được in cùng tại một vị trí ở chính giữa bàn.



Hình 2. Kích thước và dung sai của sản phẩm Green Part được lựa chọn

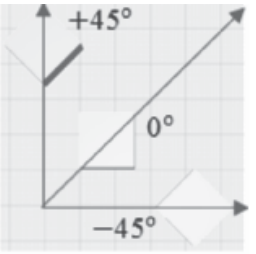
$$\text{Green Part} = \frac{\text{Final Part}}{1-\delta} \quad (1)$$

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp Face-Centered Central Composite Design (FCCCD) được sử dụng trong bài nghiên cứu nhằm xác định mức ảnh hưởng của các yếu tố cũng như tương tác của chúng. Mục tiêu của nghiên cứu là xem xét 5 thông số quy trình và 3 mức độ của chúng ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part. Ta có tổng số thí nghiệm được tính toán dựa trên tài liệu [8], thu được 26 thí nghiệm chính và 3 lần lặp thí nghiệm tại tâm. Vậy tổng cộng có 29 thí nghiệm được thực hiện. Các thông số lựa chọn và các mức độ ảnh hưởng được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Các nhân tố và mức giá trị của các thông số được chọn

Nhân tố	Giải thích ý nghĩa	Ký hiệu		Mức giá trị			Khoảng thay đổi
		Tự nhiên	Mã hóa	Dưới –1	Cơ sở 0	Trên +1	
Bề dày lớp in, (mm)	Bề dày mỗi lớp in	LT	x_1	0,1	0,2	0,3	0,1
Tốc độ in, (mm/s)	Vận tốc di chuyển của đầu in	PS	x_2	20	30	40	10
Nhiệt độ in, (°C)	Nhiệt độ vùng in	PT	x_3	200	210	220	10
Số lớp vỏ, (lớp)	Số lớp tạo bên ngoài vật in	NS	x_5	1	2	3	1
Hướng chế tạo, (°)	Hướng đặt khác nhau trên bàn in	BO	x_4	–45	0	+45	45



Hướng chế tạo được lựa chọn nghiên cứu

Phần mềm cắt lớp Cura được sử dụng để tạo thành các tệp G-Code. Các mẫu được in theo hướng thẳng đứng theo chiều dương Z của máy in. Hệ trục tọa độ của phần mềm và của máy in là như nhau. Kích thước ba phương X, Y, Z của mẫu sẽ được đo lường bằng thước cặp điện tử Insize 1114-300A với độ chia nhỏ nhất là 0,01 mm. Vị trí đo trên mẫu được chọn bằng cách chọn ngẫu nhiên tập A gồm 15 mẫu trong 29 mẫu, sau đó đo kiểm tra 5 vị trí cách nhau 3 mm trên tập A. Các vị trí có tần suất xuất hiện sai lệch nhiều nhất sẽ được chọn để tiến hành áp dụng trên toàn bộ mẫu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá sai số

Nhìn chung, các thí nghiệm với bề dày lớp cao sẽ cho ra các kích thước lớn hơn, đặc biệt theo phương Z. Nguyên nhân có thể được giải thích bởi sai số tích lũy theo từng lớp in. Khi chiều cao lớp tăng, số lớp giảm dẫn đến mỗi bước di chuyển theo trục Z lớn hơn. Quá trình đùn vật liệu ở chiều cao lớp lớn thường đi kèm với khả năng nén ép giữa các lớp kém hơn, khiến vật liệu có xu hướng giãn nở theo chiều cao hoặc lan ra ngoài biên. Ngoài ra, việc giảm số lớp cũng làm tăng hiệu ứng bậc thang gây ☞

kém chính xác biên dạng bề mặt và dẫn đến sai lệch kích thước theo cả chiều cao và phương ngang. Những yếu tố này kết hợp gây ra sai số dương so với giá trị mục tiêu. Sai số theo phương X sẽ được tính toán như sau (tương tự cho các phương Y và Z):

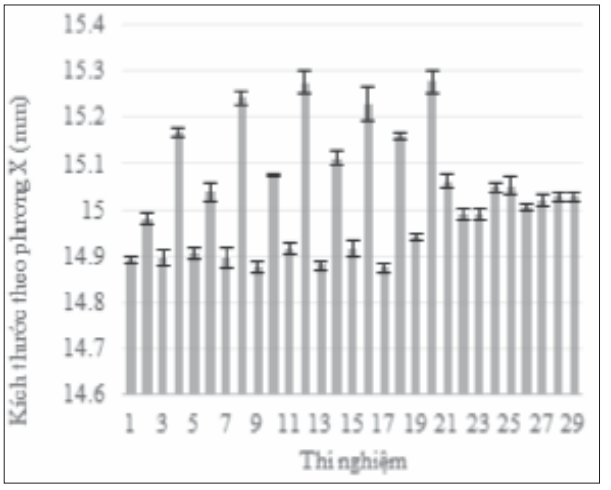
$$\mathbf{Edx}(\%) = \left|\frac{\overline{X} - 15}{15}\right| \times 100\%$$

Bảng 2. Ma trận FCCCD dạng tự nhiên, kết quả đo lường giá trị trung bình và sai số X, Y, Z

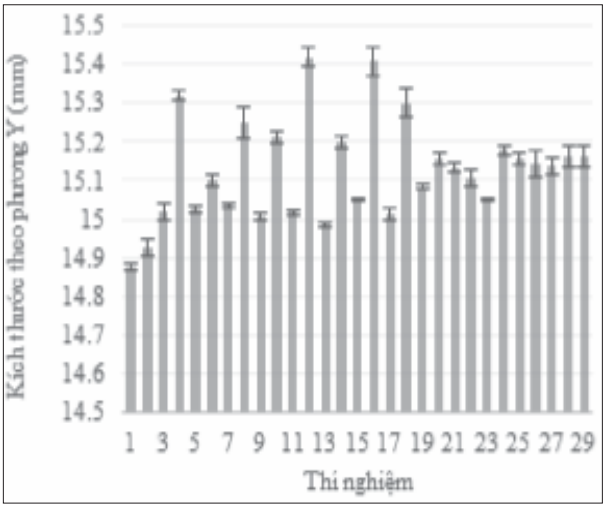
STT	Bề dày lớp in (mm)	Tốc độ in (mm/s)	Nhiệt độ in (°C)	Số lớp vỏ (lớp)	Hướng chế tạo (°)	$\overline{X}$	$\overline{Y}$	$\overline{Z}$	Edx	Edy	Edz
1	0,1	20	200	1	-45	14,89	14,88	15,10	0,73	0,83	0,67
2	0,3	20	200	1	45	14,98	14,93	15,14	0,13	0,50	0,92
3	0,1	40	200	1	45	14,90	15,02	15,14	0,69	0,13	0,92
4	0,3	40	200	1	-45	15,17	15,32	15,18	1,12	2,13	1,20
5	0,1	20	220	1	-45	14,90	15,02	15,02	0,64	0,16	0,16
6	0,3	20	220	1	45	15,04	15,10	15,14	0,25	0,67	0,96
7	0,1	40	220	1	45	14,90	15,04	15,07	0,69	0,24	0,49
8	0,3	40	220	1	-45	15,24	15,25	15,17	1,61	1,65	1,13
9	0,1	20	200	3	-45	14,88	15,01	15,02	0,83	0,05	0,16
10	0,3	20	200	3	45	15,08	15,21	15,14	0,51	1,41	0,92
11	0,1	40	200	3	45	14,92	15,02	14,99	0,56	0,11	0,09
12	0,3	40	200	3	-45	15,28	15,42	15,17	1,84	2,80	1,11
13	0,1	20	220	3	-45	14,88	14,99	15,09	0,80	0,09	0,61
14	0,3	20	220	3	45	15,11	15,20	15,10	0,75	1,32	0,64
15	0,1	40	220	3	45	14,92	15,05	15,10	0,56	0,33	0,68
16	0,3	40	220	3	-45	15,23	15,41	15,14	1,53	2,72	0,95
17	0,1	30	210	2	0	14,87	15,01	15,06	0,84	0,09	0,37
18	0,3	30	210	2	0	15,16	15,30	15,08	1,05	2,01	0,56
19	0,2	20	210	2	0	14,94	15,08	14,96	0,39	0,56	0,29
20	0,2	40	210	2	0	15,28	15,16	14,98	1,85	1,04	0,12
21	0,2	30	200	2	0	15,06	15,13	15,06	0,41	0,88	0,37
22	0,2	30	220	2	0	14,99	15,11	15,02	0,05	0,71	0,13
23	0,2	30	210	1	0	14,99	15,05	15,01	0,07	0,33	0,07
24	0,2	30	210	3	0	15,05	15,18	15,02	0,32	1,19	0,11
25	0,2	30	210	2	-45	15,05	15,16	15,06	0,35	1,04	0,37
26	0,2	30	210	2	45	15,01	15,15	15,00	0,04	0,97	0,01
27	0,2	30	210	2	0	15,02	15,14	15,04	0,13	0,92	0,28
28	0,2	30	210	2	0	15,03	15,16	15,04	0,19	1,07	0,29
29	0,2	30	210	2	0	15,03	15,16	15,04	0,19	1,07	0,29

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

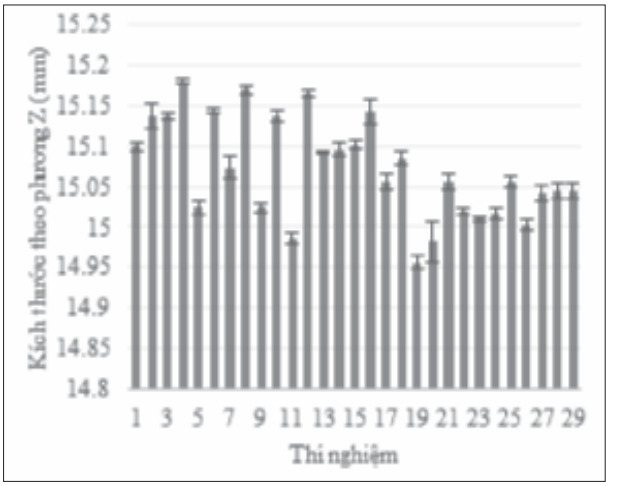
Dựa trên các số liệu thu được trên Hình 3, ta thấy hầu hết các giá trị $\bar{Y}$ luôn lớn hơn $\bar{X}$ trong các trường hợp. Trong khi, trên lý thuyết hai phương này thường được xem là đẳng hướng do nằm trên cùng mặt phẳng và được điều khiển bởi hệ truyền động tương đương. Nguyên nhân có thể đến từ các yếu tố như độ căng đai không đều, hiệu chuẩn và cách hoạt động đường in của đầu in không đồng nhất theo từng phương. Ngoài ra, hiện tượng đùn dư và lan rộng vật liệu tại biên cũng có thể xảy ra làm gia tăng sai lệch dị hướng giữa chúng.



(a)



(b)



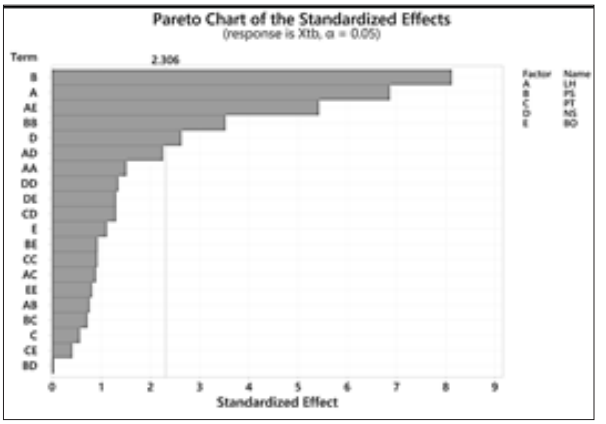
(c)

Hình 3. Kích thước trung bình (a) Trục X, (b) Trục Y, (c) Trục Z với thanh lỗi tương ứng là ± Độ lệch chuẩn của phép đo từng mẫu

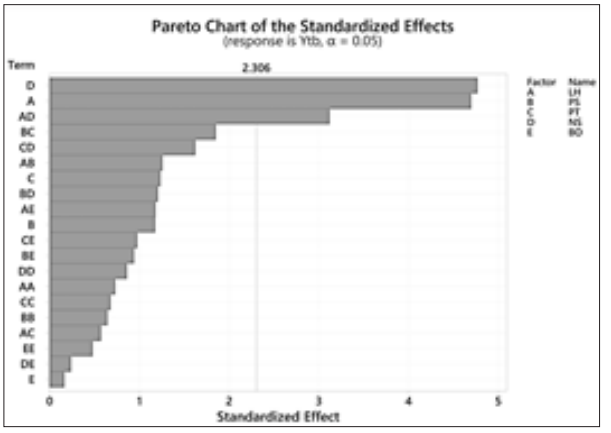
Sai số nhỏ nhất theo các phương được ghi nhận tại các mẫu 22, 23, 26 (Edx), mẫu 9, 13, 17 (Edy) và mẫu 23, 26 (Edz), trong đó bề dày lớp in 0,2 mm, tốc độ in 30 mm/s và nhiệt độ 210°C tỏ ra ưu việt hơn. Mẫu 23 đạt sai số trung bình nhỏ nhất với bộ thông số: LH = 0,2 mm; PS = 30 mm/s; PT = 210°C; NS = 1; BO = 0°. Ngược lại, sai số lớn nhất xuất hiện ở các mẫu có tốc độ in cao (40 mm/s), bề dày lớp in lớn (0,3 mm) và số lớp vỏ nhiều (3 lớp), cho thấy bề dày lớp và tốc độ in là hai yếu tố ảnh hưởng mạnh đến sai số theo cả ba phương. Sai số lớn nhất theo phương X, Y lên đến 2,8% và theo phương Z là 1,2%. Tuy nhiên, sai số Edx/Edy và Edz đôi khi thể hiện hành vi ngược nhau. Ở các thí nghiệm 2, 3, 6 và 15, mặc dù Edx/Edy thấp, nhưng lại thu được giá trị Edz khá cao. Điều này cho thấy sự phụ thuộc của độ chính xác kích thước không chỉ riêng lẻ vào các đại lượng mà có thể có sự phụ thuộc vào tương tác giữa chúng. Do đó, nghiên cứu này đã tiến hành tối ưu đa mục tiêu và trình bày chi tiết trong Mục 3.3.

☞

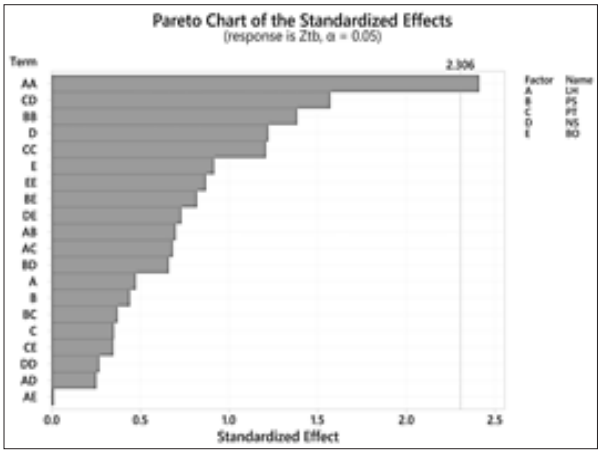
3.2. Mô hình hồi quy



(a)



b)

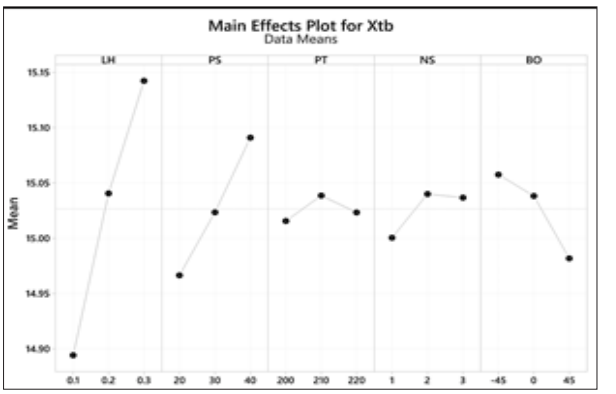


(c)

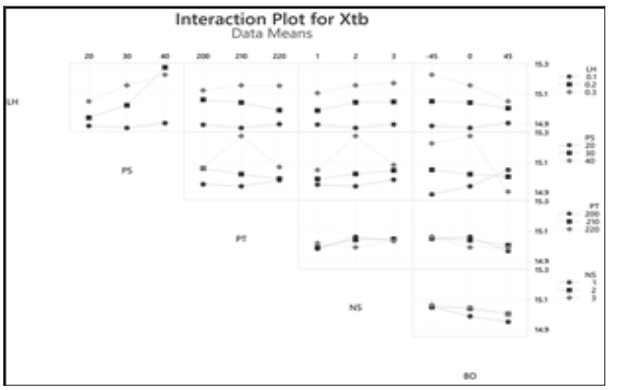
Hình 4. Biểu đồ Parerto giá trị trung bình theo (a) Phương X, (b) Phương Y, (c) Phương Z

Từ dữ liệu trong Bảng 2 xây dựng mô hình hồi quy bằng phần mềm Minitab thu được đồ thị Pareto thể hiện trên Hình 4, Đồ thị hiệu ứng chính và Đồ thị tương tác giữa các biến trên Hình 5.

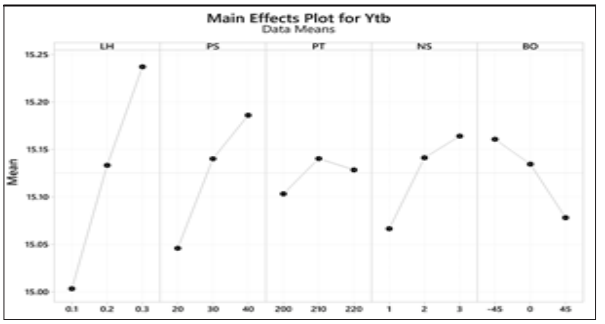
Biểu đồ Pareto cho thấy tốc độ in là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất theo phương X, tiếp đó là bề dày lớp in. Bên cạnh đó, PS×PS thể hiện ảnh hưởng phi tuyến của tốc độ in và các tương tác như LH×BO, LH×NS cho thấy chúng cần được điều chỉnh đồng thời. Đối với phương Y, số lớp vỏ là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất, tiếp đến là bề dày lớp in và tương tác LH×NS. Ngoài ra, tương tác PS×PT và PT×NS cũng có ảnh hưởng do liên quan đến khả năng lấp đầy vật liệu. Mặc khác, các yếu tố ảnh hưởng tới phương Z là các yếu tố phi tuyến như LH×LH và các tương tác như PT×NS.



(a)



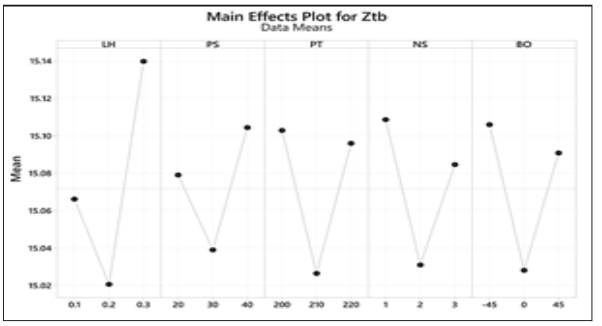
(b)



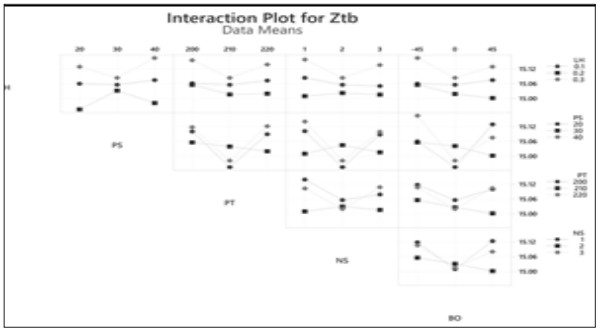
(c



(d)



(e)



(f)

Hình 5. Biểu đồ hiệu ứng chính và biểu đồ tương tác giữa các biến: (a) (b) Phương X, (c) (d) Phương Y và (e) (f) Phương Z

Biểu đồ hiệu ứng chính cho thấy kích thước $\overline{X}$ tăng mạnh với xu hướng gần như tuyến tính với bề dày lớp in thay đổi từ 0,1 đến 0,3 mm. Tốc độ in cũng góp phần làm tăng kích thước, đặc biệt tại 40 mm/s. Tuy nhiên, hướng chế tạo có biểu hiện trái ngược khi làm $\overline{X}$ giảm dần. Trong các tương tác thì LH×BO thể hiện tương tác mạnh nhất khi các đường đáp ứng cắt nhau rõ rệt, cho thấy ảnh hưởng của bề dày lớp lên $\overline{X}$ phụ thuộc lớn vào hướng chế tạo.

Bên cạnh đó, giá trị $\overline{Y}$ thể hiện cùng xu hướng với $\overline{X}$. Các thông số bề dày lớp in, tốc độ in và số lớp vỏ; ảnh hưởng từ cao đến thấp; đều có quan hệ đồng biến với $\overline{Y}$. Về tương tác các cặp LH×NS và LH×PS có ảnh hưởng mạnh nhất với dạng phân kỳ rõ rệt, cho thấy tác động của bề dày lớp in được tăng cường khi kết hợp với số lớp vỏ hoặc tốc độ in. Cặp LH×BO và PS×BO có sự đảo chiều nói lên ảnh hưởng của bề dày lớp in, tốc độ in lên $\overline{Y}$ có phụ thuộc vào hướng chế tạo.

Giá trị $\overline{Z}$ có xu hướng ảnh hưởng phi tuyến bởi các thông số với cực trị tại mọi mức giá trị trung bình, trong đó bề dày lớp in là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất. Biên độ biến thiên của $\overline{Z}$ nhỏ nhất trong ba phương (quanh 15,00-15,10), hầu hết các cặp tương tác đều không có ý nghĩa ngoại trừ LH×PS và LH×PT. Cặp LH×PS thể hiện tương tác rõ nhất khi $\overline{Z}$ đạt cực tiểu nhưng mức giảm phụ thuộc vào PS. Cặp LH×PT cũng có ảnh hưởng nhất định, dù biên độ nhỏ hơn.

Bảng 3. Kết quả mô hình hồi quy theo các phương X, Y, Z

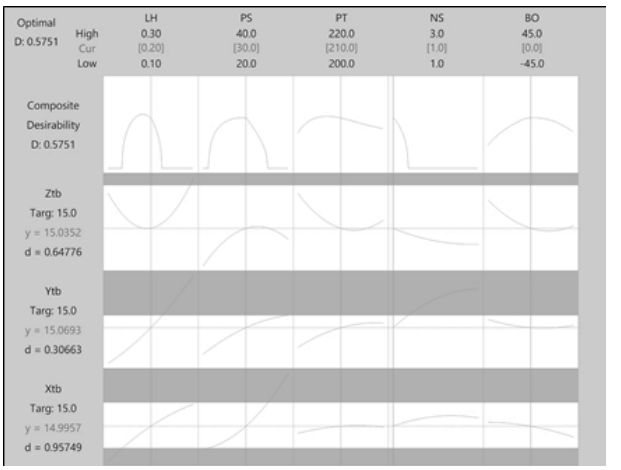
Đáp ứng	R^2 (%)	R^2 (adj) (%)	Biến tác động mạnh nhất
$\overline{X}$	98,42	94,49	PS LH LH×BO
$\overline{Y}$	96,83	88,90	NS LH LH×NS
$\overline{Z}$	87,06	54,70	LH×LH PT×NS PS×PS

3.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu

Bảng 4. Bộ thông số tối ưu cho từng mục tiêu

Mục tiêu	LH	PS mm/s	PT °C	NS lớp	BO (°)	Composite Desirability
$\overline{X}$	0,2	31	200	2	45	1
$\overline{Y}$	0,2	28,5	200	1	45	1
$\overline{Z}$	0,1	20	207	3	45	0,974
$\overline{X}$,$\overline{Y}$,$\overline{Z}$	0,2	30	210	1	0	0,571

Sai lệch gây ra theo phương X, Y có liên quan mật thiết đến bề dày lớp in, tốc độ in và số lớp vỏ. Tuy nhiên theo phương Z, yếu tố ảnh hưởng sâu sắc lại là các biến tương tác. Vì vậy, bài toán tối ưu được đặt ra nhằm tìm giá trị mục tiêu 15 ± 0,1 mm cho mỗi cạnh. Bên cạnh đó, mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu được thiết lập để tìm ra bộ thông số tối ưu chung cho cả ba phương X, Y, Z. Bộ thông số tối ưu chung cho cả ba phương X, Y, Z được quan sát tại các mức giá trị trung bình với bề dày lớp in 0,2 mm, tốc độ in 30 mm/s, nhiệt độ in 210°C, số lớp vỏ là 1 cùng với hướng in tại 0°.



Hình 6. Kết quả tối ưu cho cả ba phương X, Y, Z

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu hiện tại chỉ ra rằng, độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

của công nghệ in 3D kim loại bằng sợi vật liệu Cu/PLA phụ thuộc nhiều vào các yếu tố công nghệ. Các kết luận chính của bài nghiên cứu này có thể kể đến bao gồm:

- Sai số kích thước lớn nhất theo phương X, Y lên tới 2,8% phụ thuộc vào dày lớp in, tốc độ in và số lớp vỏ;

- Sai số lớn nhất theo phương Z với giá trị nhỏ hơn rơi vào khoảng 1,2% chủ yếu phụ thuộc vào độ phi tuyến LH×LH và tương tác của cặp thông số PT×NS;

- Bộ thông số tối ưu được tìm ra cho cả từng phương và tổng hợp ba phương X, Y, Z. Bộ thông số tối ưu được tìm ra là bề dày lớp in 0,2 mm, tốc độ in 30 mm/s, nhiệt độ in 210°C, số lớp vỏ là 1 cùng với hướng in tại 0°.

Nghiên cứu này đề xuất bộ thông số tối ưu cũng như một phương pháp thực nghiệm cho loại vật liệu Cu/PLA nói riêng và vật liệu nhựa pha kim loại nói chung trong công nghệ MFE. Tuy nhiên, việc nghiên cứu tiếp tục ở giai đoạn Final Part là hết sức cần thiết để xác nhận lại độ co rút và đánh giá sâu thêm về tầm quan trọng của việc kiểm soát chất lượng Green Part đến chất lượng sản phẩm sau cùng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (HCMUT – VNU-HCM) theo mã số đề tài SVKSTN-2024-CK-49. Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thực hiện nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **02/5/2025**
Ngày phản biện: **21/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. The Virtual Foundry https://thevirtualfoundry.com/print/

[2]. Ajjarapu, K. P. K. (2023), "*Synergistic strategies in sinter-based material extrusion (MEX) 3D printing of copper: Process development, product design, predictive maps and models*". https://doi.org/10.18297/etd/4197

[3]. BCN3D Technologies (2022), "*Get to know the 3D printer metal filament options in your Metal Pack*". Truy vấn ngày 26/02/2025, https://www.bcn3d.com/get-to-know-the-3d-printer-metal-filament-options-in-your-metal-pack/

[4]. Buj-Corral, I.; Sivatte-Adroer, M., "*An Experimental Investigation about the Dimensional Accuracy and the Porosity of Copper-Filled PLA Fused Filament Fabrication Parts*". Metals 2023, 13, 1608. https://doi.org/10.3390/met13091608

[5]. Mahros Darsin, H.S, M.E.R, Y.H, M.A.C (2022), "*The Effect of Nozzle Temperature, Layer Height, and Infill Pattern on Dimensional Accuracy and Flexural Strength of 3D Printed Cu-PLA Filaments*". Gongcheng AES, Vol.54, No.3, pp. 1437-1449. ResearchGate Link.

[6]. International Organization for Standardization, ASTM International & Standards Australia (2021), AS/ISO/ASTM 52902:2021 – Additive manufacturing – Test artifacts – Geometric capability assessment of Additive manufacturing systems.

[7]. International Organization for Standardization (1993), ISO 2768-1: General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications.

[8]. Nguyễn Hữu Lộc (2021), "*Quy hoạch và phân tích thực nghiệm*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.

NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH THỬ NGHIỆM KIỂM TRA HỆ THỐNG PHANH KHẨN CẤP THANG MÁY GIA ĐÌNH

RESEARCH ON AN EXPERIMENTAL MODEL FOR TESTING EMERGENCY BRAKE SYSTEMS IN HOME ELEVATORS

Nguyễn Thị Ngọc Huyền, Lê Đức Bảo
Khoa Cơ khí, Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội
Email: huyen.nguyenthingoc@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Phanh khẩn cấp là bộ phận an toàn quan trọng trong thang máy gia đình, giúp ngăn chặn các sự cố nghiêm trọng, nguy hiểm như rơi hoặc vượt tốc độ cabin. Bài báo này nghiên cứu xây dựng mô hình thử nghiệm kiểm tra phanh khẩn cấp với bộ hạn chế chế tốc độ 2m/s, xác định thời gian tác động phanh thông qua cảm biến đo gia tốc khi vượt quá tốc độ định mức. Thông qua mô hình, kết quả thử nghiệm bước đầu trong trường hợp rơi tự do các thông số như quãng đường phanh, vận tốc của cabin và thời gian bộ khống chế vượt tốc được thiết lập và kết nối máy tính để hiển thị kết quả đo làm cơ sở để kiểm tra, đánh giá mức độ an toàn sử dụng của phanh khẩn cấp.

Từ khóa: *Phanh khẩn cấp; Bộ hạn chế tốc độ; Thang máy gia đình.*

ABSTRACT

The emergency brake is a critical safety component in home elevators, helping to prevent serious and hazardous incidents such as free-fall or excessive cabin speed. This paper presents the development of an experimental model for testing emergency brakes equipped with a speed governor set at 2 m/s. The actuation time of the brake is determined by an acceleration sensor that detects when the cabin exceeds the rated speed. Using this model, preliminary test results in free-fall scenarios are obtained, including parameters such as braking distance, cabin velocity, and the response time of the overspeed governor. These parameters are collected and transmitted to a computer for real-time display, providing a basis for evaluating and verifying the operational safety of emergency brake systems in home elevators.

Keywords: *Emergency brake; Overspeed governor; Home elevator.*

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Để đảm bảo an toàn cho người sử dụng, các tiêu chuẩn kỹ thuật đều quy định bắt buộc việc trang bị và kiểm soát hệ thống phanh khẩn cấp trong thang máy gia đình. Hệ thống phanh khẩn cấp được trang bị nhằm phòng ngừa các tình huống như cabin rơi tự do hoặc chạy quá tốc độ do đứt cáp, hỏng máy kéo hay sự cố mất điện [1, 2, 3]. Việc thiết kế, kiểm định, lắp đặt và bảo trì phanh khẩn cấp phải tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn kỹ thuật trong nước và quốc tế. Các tiêu chuẩn này đều quy định rõ ràng về: Nguyên lý làm việc của phanh khẩn cấp; Yêu cầu thử nghiệm có tải và không tải; Đặc tính vật liệu, ma sát và kiểm soát mòn; Phương pháp kiểm tra định kỳ, tần suất bảo dưỡng; Yêu cầu về hồ sơ bảo trì, thay thế chi tiết phanh sau thời gian sử dụng nhất định. Quy định chi tiết các yêu cầu kiểm tra, thử nghiệm bộ hãm an toàn: Thử nghiệm lực phanh, quãng đường phanh, khả năng hoạt động khi vượt tốc hoặc có sự cố; Kiểm tra mức độ mòn, biến dạng của má phanh, ray dẫn hướng sau mỗi lần thử nghiệm; Các phép thử về độ tin cậy, độ bền của bộ phanh khẩn cấp theo quy trình chuẩn, đảm bảo an toàn tuyệt đối cho người sử dụng [4, 5, 6].

Trong thang máy gia đình, có ba loại phanh khẩn cấp phổ biến được sử dụng, tùy thuộc vào kiểu dẫn động của thang [7]: Phanh khẩn cấp kiểu kẹp ray; Phanh thủy lực ngắt dòng và Phanh điện từ. Việc lựa chọn và lắp đặt loại phanh khẩn cấp phù hợp cần tuân thủ các tiêu chuẩn kỹ thuật và an toàn đảm bảo bảo trì định kỳ để hệ thống phanh hoạt động hiệu quả và an toàn.

Cơ chế phanh khẩn cấp của thang máy (đặc biệt là bộ hãm an toàn) chủ yếu dựa vào ma sát giữa má phanh và ray dẫn hướng để hấp thụ năng lượng và dừng cabin. Do đó, nghiên cứu về ma sát và mài mòn của cặp vật liệu má phanh – ray dẫn hướng là vấn đề quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả và độ tin cậy của hệ thống phanh. Nhiều nghiên cứu đã được tiến hành nhằm hiểu rõ hơn và cải thiện hiệu năng ma sát, vật liệu dùng cho má phanh có tính chống mòn tốt như vật liệu gốm, sự phát nhiệt tại bề mặt phanh khẩn cấp. Do vậy, tiêu chuẩn yêu cầu sau mỗi thử nghiệm phanh, cần kiểm tra kỹ tình trạng má phanh và ray dẫn hướng: nếu có biến dạng, vết nứt hoặc mòn không cho phép trên bề mặt ma sát phải được ghi nhận và đánh giá [8, 9]. Các nghiên cứu cho thấy việc duy trì hệ số ma sát ổn định và kiểm soát mài mòn là yếu tố cốt lõi để đảm bảo phanh khẩn cấp luôn hoạt động hiệu quả. Điều này đòi hỏi lựa chọn vật liệu má phanh phù hợp, thiết kế hình học má phanh – ray tối ưu, cũng như phương pháp bôi trơn, xử lý bề mặt đảm bảo ma sát khi cần phanh, vừa hạn chế mòn trong quá trình sử dụng thông thường [10, 11, 12].

Bài báo này tập trung vào vấn đề mô hình hóa, bằng cách đề xuất cơ sở thiết kế mô hình kiểm tra phanh khẩn cấp cho thang máy gia đình, xây dựng mô hình thử nghiệm thực nghiệm để dễ dàng đo kiểm các thông số kiểm tra độ an toàn. Từ đó, có thể đánh giá hiệu năng phanh, đưa ra khuyến nghị và xu hướng đánh giá thông số ảnh hưởng đến ma sát bộ hãm (má phanh) trong quá trình sử dụng, khả năng mòn sau thời gian dài không kích hoạt nâng cao độ tin cậy, an toàn cho thang máy gia đình trong tương lai.

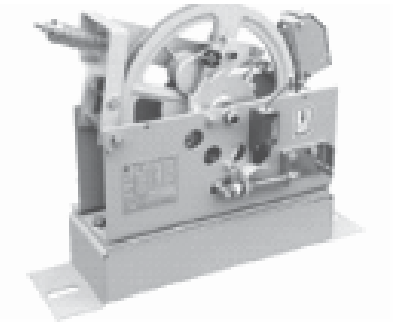
2. MÔ HÌNH THỬ NGHIỆM PHANH KHẨN CẤP [7, 13, 14, 15]

Mô hình thiết kế sử dụng bộ hãm an toàn tiên tiến để thử nghiệm, có ký hiệu DZ-QJ38C của hãng DAZEN, là cơ cấu phanh cơ khí gắn trên cabin, thường gồm các nêm phanh kẹp chặt ☞

vào ray dẫn hướng khi được kích hoạt được thể hiện hình 1. Bộ hãm an toàn được kết nối với bộ hạn chế tốc độ (governor), khi tốc độ cabin vượt quá ngưỡng cho phép hoặc xảy ra đứt cáp, governor sẽ kích hoạt bộ hãm khiến các má phanh cọ xát và kẹp chặt ray, dừng cabin ngay lập tức. Bộ hãm an toàn là loại lũy tiến có thông số chính: Thang máy có tốc độ: 0,64 m/s ≤ v ≤2,5 m/s; đường ray: ≤ 16mm; tiêu chuẩn thực hiện: GB/T7588.1-2020, GB/T7588.2-2020; tải trọng tĩnh ≤ 3000kg. Sử dụng bộ khống chế tốc độ thang máy DZ-XS24A như hình 2 để thử nghiệm có thông số sau: có tốc độ 2m/s, thông số kỹ thuật ròng rọc, cáp: Φ240, Φ8, tải trọng nâng: ≥ 500N được lắp trên đỉnh mô hình thang máy.



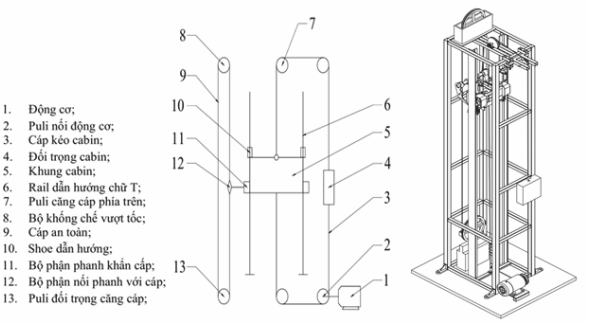
Hình 1. Bộ hãm an toàn trên ray



Hình 2. Bộ khống chế tốc độ

2.1. Thiết kế cơ khí

Sơ đồ nguyên lý mô hình thiết kế đảm bảo có thể thử nghiệm trong phòng thí nghiệm được thiết kế như hình 3.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý thiết kế hệ thống phanh khẩn cấp thang máy

Cụm cơ khí chính được thiết kế gồm:

- ***Cụm truyền động:*** Sử dụng động cơ điện được điều khiển vô cấp bằng biến tần để truyền chuyển động trực tiếp qua hệ puly - cáp.

- ***Cụm truyền cáp:*** Liên quan đến việc truyền chuyển động của cáp trong hệ thống, liên kết cụm truyền động với cabin hoặc bộ khống chế tốc độ.

- ***Bộ khống chế tốc độ:*** Được thiết kế dựa trên nguyên tắc ly tâm và có vai trò kiểm soát tốc độ cabin. Khi tốc độ cabin vượt quá giới hạn cho phép, bộ khống chế tốc độ sẽ kích hoạt.

- ***Cụm phanh khẩn cấp:*** Là bộ hãm an toàn có chức năng dừng cabin và giữ trên ray dẫn hướng được lắp đặt trên khung cabin thang máy và được kích hoạt bởi bộ điều khiển quá tốc độ khi tốc độ chạy của cabin vượt quá quy định. Kiểu má phanh dạng nêm được chọn để tính toán, thiết kế. Dẫn hướng thang máy: Sử dụng loại ray là T78/B có vật liệu đế và vỏ bằng thép.

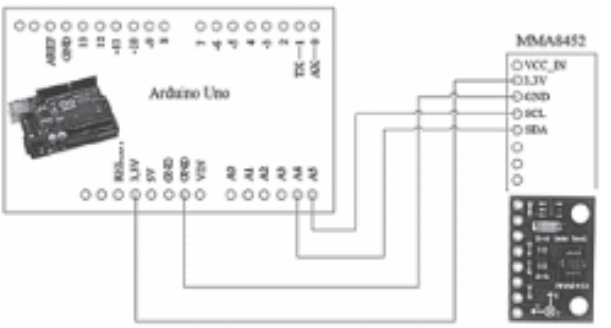
- ***Thiết bị đối trọng căng cáp:*** Phụ trợ cho bộ chống vượt tốc, tác dụng luôn kéo căng cáp của cơ cấu hãm khẩn cấp.

Theo tiêu chuẩn TCVN quy định bộ hãm khẩn cấp sẽ tự động khởi động khi vận tốc

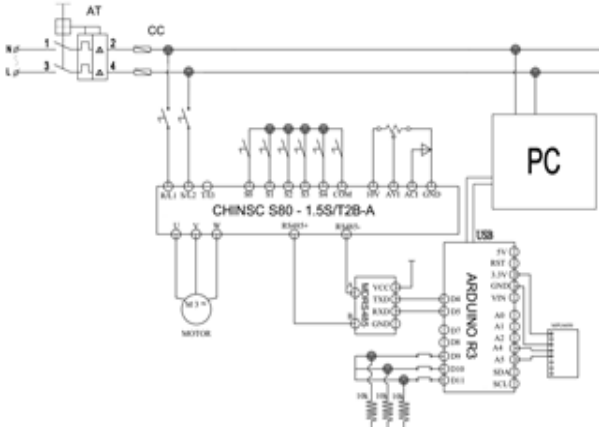
đi xuống của cabin vượt quá giá trị cho phép. Vận tốc này ít nhất phải bằng 115% vận tốc định mức của cabin, nhưng không vượt quá giá trị cho phép trong loại hãm khẩn cấp cụ thể được sử dụng.

2.2. Thiết kế điều khiển

Phần điều khiển của mô hình thử nghiệm được thiết kế tập trung vào việc điều khiển cụm dẫn động sử dụng vi điều khiển Arduino và các mô đun điện tử liên quan, có kết nối với hệ thống đo vận tốc và các công tắc an toàn. Hệ thống điều khiển trong mô hình được thiết kế gồm các thiết bị và linh kiện điện, điện tử, cảm biến đảm bảo khả năng thử nghiệm cho thang máy và an toàn. Sơ đồ mạch đo gia tốc được biểu diễn ở hình 4.



Hình 4. Sơ đồ mạch đo gia tốc



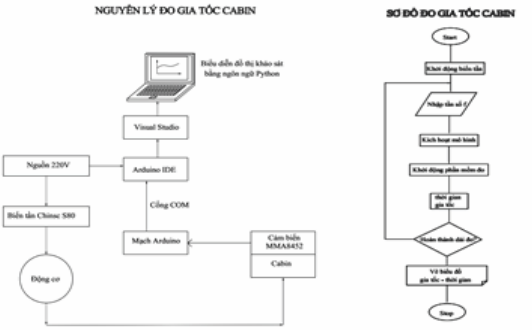
Hình 5. Sơ đồ mạch điều khiển của mô hình

Phần mềm Arduino IDE: là một phần mềm với một mã nguồn mở, được sử dụng chủ yếu để viết và biên dịch mã vào module Arduino, sử dụng ngôn ngữ lập trình C/C thuận tiện trong việc thiết kế chương trình lập cho các bo mạch Arduino. Sử dụng các phương thức giao tiếp để đọc và biểu diễn kết quả trên Arduino IDE, Visual Studio (Python), Excel. Sơ đồ nối mạch điều khiển thiết kế như hình 5.

2.3. Thuật toán đo giao diện kiểm tra

Hệ thống điều khiển và hệ thống đo được thiết kế để thu thập dữ liệu trong quá trình thử nghiệm. Hệ thống đo vận tốc cabin sử dụng cảm biến gia tốc MMA8452. Dữ liệu từ cảm biến được xử lý bởi vi điều khiển Arduino Uno R3. Dữ liệu được truyền không dây (qua mô đun HC-12) đến máy tính để xử lý và hiển thị. Phần mềm Visual Studio với ngôn ngữ Python được sử dụng cho việc này.

Thu thập và đánh giá kết quả: Hệ thống đo thu được các kết quả khảo sát vận tốc rơi của cabin. Các kết quả thử nghiệm mẫu cho thấy việc đo lường vận tốc lớn nhất, gia tốc lớn nhất và thời gian đạt vận tốc lớn nhất. Mục đích là khảo sát đặc tính ma sát của má phanh, sơ đồ nối dây từ cảm biến đến mạch Arduino Uno. Nguyên lý đo được thể hiện ở sơ đồ thuật toán như hình 7.

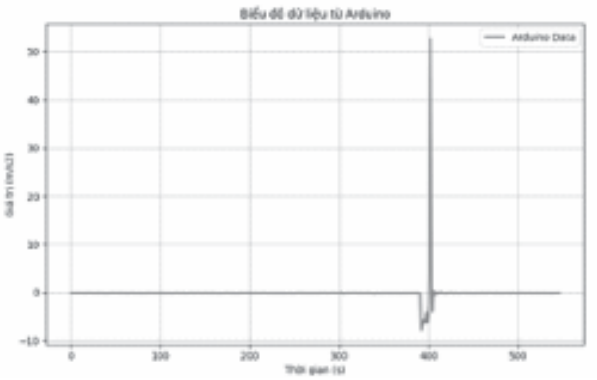


Hình 7. Sơ đồ nguyên lý đo gia tốc và thuật toán của cabin

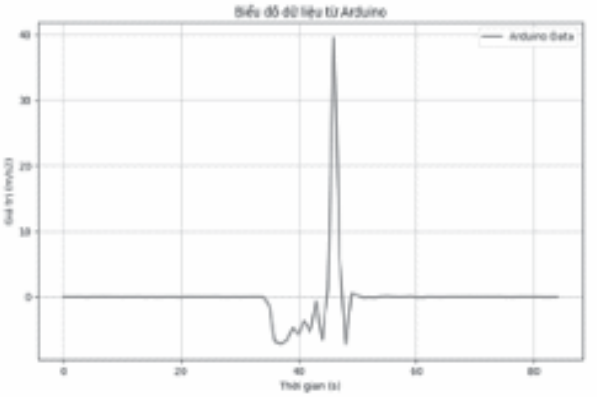
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình đã được thiết kế, chế tạo phù hợp phòng thí nghiệm với thông số kỹ thuật cơ bản: Kích thước mô hình: 845×1000×3000 mm; Hành trình cabin: 2000 mm; Khối lượng cabin: 10 kg; Khối lượng đối trọng: 15kg; Thiết bị điều khiển động cơ: Biến tần CHINSC S80; Thiết bị đo: Cảm biến MMA6050, máy tính laptop, mô hình đảm bảo đủ độ cứng vững để tiến hành các thực nghiệm kiểm tra thông số tiêu chuẩn.

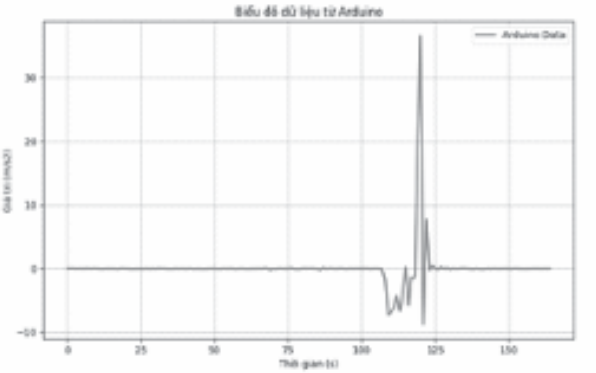
Thực nghiệm được tiến hành đo tại các tốc độ 1,8 m/s; 2 m/s; 3 m/s; 4 m/s, kết quả được hiển thị trên các hình 8, 9, 10, 11 tương ứng. Bảng gia tốc, quãng đường dừng ứng với vận tốc cần kiểm nghiệm như kết quả bảng 1.



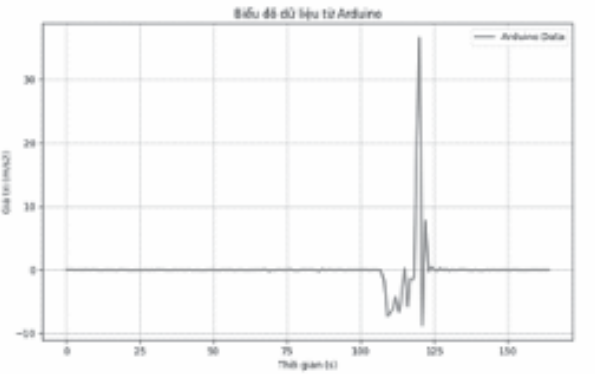
Hình 8. Đo tại vận tốc đặt v = 1,8m/s



Hình 9. Đo tại vận tốc đặt v = 2m/s



Hình 10. Đo tại vận tốc đặt v = 3m/s



Hình 11. Đo tại vận tốc đặt v = 4m/s

Bảng 1. Bảng kết quả đo.

Tốc độ (m/s)	Tốc độ kích hoạt phanh (m/s)	Gia tốc tại thời điểm cabin dừng (m/s^2)	Quãng đường từ khi kích hoạt phanh đến lúc cabin dừng (m)
1,8	1,83	6,0	0,28
2	1,73	5,8	0,26
3	1,93	6,4	0,29
4	1,97	6,3	0,31

Từ đồ thị trên cho thấy, tại vận tốc 4 m/s (hình 11), quãng đường từ lúc phanh kích hoạt đến lúc cabin dừng là 0,31 m, theo số liệu đo được gia tốc lúc dừng là 6,3 m/s^2 và vận tốc kích hoạt của phanh là 1.97 m/s. Tương tự, với vận tốc 2 m/s (hình 9), quãng đường từ lúc phanh kích hoạt đến lúc cabin dừng là

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

0,26 m, gia tốc lúc dừng là 5,8 m/s^2 và vận tốc kích hoạt của phanh là 1,73 m/s. Kết quả thực nghiệm trên cho thấy bộ hãm khẩn cấp (bộ hãm an toàn) đã được kích hoạt khi vận tốc rơi lớn nhất của cabin đạt xấp xỉ v ≈ 1,8-2 m/s, sai số nằm trong khoảng cho phép, điều này phù hợp với thông số thiết kế đã đặt ra.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu mô hình thử nghiệm bước đầu cho phép kiểm nghiệm gia tốc, đánh giá được vận tốc kích hoạt của hệ thống phanh khẩn cấp thông qua gia tốc khi rơi của cabin thang máy và quãng đường cabin còn di chuyển. Đây là cơ sở để đánh giá tính hiệu quả của cơ cấu hạn chế tốc độ, cơ cấu hãm phanh khẩn cấp, kể đến tính chất ma sát của vật liệu làm má phanh và khuyến cáo cho người sử dụng có kế hoạch bảo trì, kiểm tra hệ thống phanh khẩn cấp hợp lý, nâng cao hiệu năng, an toàn khi hoạt động của thang máy.❖

Ngày nhận bài: **02/05/2025**
Ngày phản biện: **26/05/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Danh Sơn, "*Thang máy*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2018.

[2]. Shuangchang Feng, Jie Chen and Yanchun Liang, "*Introduction of an Elevator Guide Shoe with Position and Lateral Force Monitoring Function*". IOP Publishing, ICMIA-2022, doi:10.1088/1742-6596/2264/1/012004, 2022.

[3]. Al-Kodmany, Kheir, "*Smart elevator systems*". Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research 6.1 (2023).

[4]. ASME A17.1-2013/CSA B44-13, "*Safety Code for Elevators and Escalators Includes Requirements for Elevators, Escalators, Dumbwaiters, Moving Walks, Material Lifts, and Dumbwaiters With Automatic Transfer Devices*".

[5]. "*Yêu cầu an toàn về cấu tạo và lắp đặt thang máy*", TCVN 6396-28:2013 – Bộ Khoa học và Công nghệ, 2013.

[6]. Tiêu chuẩn quốc gia của Việt Nam (TCVN) về thang máy: TCVN 6396-50:2017 / EN 81-50:2014, "*Quy tắc an toàn về cấu tạo và lắp đặt thang máy – Kiểm tra, tính toán và thử nghiệm các bộ phận thang máy – Phần 50: Kiểm tra, tính toán và thử nghiệm các bộ phận thang máy*".

[7]. Janovský, Lubomír, "*Elevator mechanical design*". Elevator World Inc, 1999.

[8]. Facai Ren, "*Wear analysis of elevator brake shoe*". IOP Publishing, MATMA-2022, Journal of Physics: Conference Series, DOI 10.1088/1742-6596/2403/1/012023, 2022.

[9]. Qifeng Peng, Zhongxing Li, Hong Yuan, Guojian Huang, Shanqing Li, Xueli Sun, "*A Model-Based Unloaded Test Method for Analysis of Braking Capacity of Elevator Brake*". Advances in Materials Science and Engineering, https://doi.org/10.1155/2018/8047490, 2018.

[10]. Zhaolin Ren, "*The Performance Analysis of Elevator Brake*". IOP Publishing, AMEE-2022, Journal of Physics: Conference Series, doi:10.1088/1742-6596/2463/1/012047, 2023.

[11]. X Ma, G Pan, P Zhang, Q Xu, X Shi, Z Xiao, Y Han, "*Experimental evaluation of braking pad materials used for high-speed elevator*". Wear, https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203872, 2021.

[12]. Yu, Chunyu, et al., "*Research progress on friction and wear properties of powder metallurgy brake pad*". Advances in Mechanical Engineering 14.12 (2022): 16878132221126854.

[13]. Trịnh Chất, Lê Văn Uyển, "*Tính toán thiết kế hệ dẫn động cơ khí*". NXB. Giáo dục, 2014.

[14]. Ninh Đức Tốn, Nguyễn Thị Xuân Bảy, "*Dung sai lắp ghép và kỹ thuật đo lường*". NXB. Giáo dục, 2006.

[15]. Catalogue dazentech.com/elevator-overspeed-governor.

ĐIỀU ĐỘ ĐỘNG TÀU VÀO BẾN CẢNG CONTAINER BẰNG GIẢI THUẬT LOCAL SEARCH

DYNAMIC SCHEDULING OF SHIPS AT CONTAINER PORT BERTHS USING LOCAL SEARCH ALGORITHM

Hoàng Trọng Trần Huy
Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công Thương Thành Phố Hồ Chí Minh
Email: tantranhaico@gmail.com
Hoặc: huyhtt@huit.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu bài toán điều độ tàu vào bến cảng container trong trường hợp động, với mô hình không gian cầu cảng hỗn hợp, kết hợp giữa các đặc điểm của cầu cảng rời rạc và liên tục. Bài toán được thiết lập dựa trên nền tảng của bài toán cutting stock 2D, một bài toán NP-Hard, và phù hợp với hoạt động tại các cảng container ở Việt Nam, nơi không gian cầu cảng thường hạn chế. Nghiên cứu đề xuất một giải thuật meta-heuristic để giải quyết bài toán với kích thước tương đương thực tế trong thời gian tính toán chấp nhận được. Tính hiệu quả của phương pháp được kiểm chứng thông qua các thí nghiệm số. Kết quả nghiên cứu nhằm tối ưu hóa việc sử dụng không gian cầu cảng, giảm thiểu thời gian quay vòng tàu và hỗ trợ các nhà khai thác cảng trong việc lập lịch trình tàu một cách hiệu quả và linh hoạt.

Từ khóa: *Cầu cảng; Tối ưu hóa; Meta-heuristics; Điều độ; Tàu container.*

ABSTRACT

This paper focuses on studying the problem of ship scheduling at container port berths in dynamic conditions, utilizing a mixed berth space model that combines the characteristics of discrete and continuous berths. The problem is formulated based on the 2D cutting stock problem, an NP-Hard problem, and aligns with operations at container ports in Vietnam, where berth space is often limited. The research proposes a meta-heuristic algorithm to solve the problem at realistic scales within acceptable computation times. The efficiency of the method is verified through numerical experiments. The research aims to optimize berth space usage, minimize ship turnaround time, and assist port operators in scheduling ships effectively and flexibly.

Keywords: *Berth; Optimization; Meta-heuristics; Scheduling; Container vessels.*

1. GIỚI THIỆU

Bài toán phân bổ bến (Berth Allocation Problem - BAP), còn được biết đến là bài toán lập lịch bến, là một thách thức hoạt động quan trọng trong các cảng container. Vấn đề này liên quan đến việc chỉ định không gian cầu cảng cho các tàu theo thời gian để tạo điều kiện thuận lợi cho hoạt động bốc xếp hàng hóa. Việc phân bổ bến hiệu quả có vai trò tối quan trọng trong việc tối đa hóa năng suất của cảng, giảm thiểu thời gian quay vòng của tàu và giảm tắc nghẽn. Chi phí xây dựng và mở rộng các bến là rất lớn, do đó việc sử dụng tối ưu các nguồn lực hiện có trở nên đặc biệt quan trọng. Bản chất cơ bản của BAP là một bài toán NP-completed , điều này cho thấy việc tìm ra giải pháp tối ưu cho các trường hợp quy mô lớn trong thực tế là rất khó khăn về mặt tính toán. Điều này giải thích cho khối lượng lớn các nghiên cứu dành cho việc phát triển các phương pháp heuristic và metaheuristic hiệu quả.

Sự gia tăng không ngừng của khối lượng giao thông container và không gian bến có hạn càng làm nổi bật tầm quan trọng của các chiến lược phân bổ bến hiệu quả đối với sự bền vững và tăng trưởng của các cảng. Các giải pháp BAP hiệu quả có mối tương quan trực tiếp với khả năng xử lý khối lượng thương mại ngày càng tăng của một cảng mà không cần mở rộng cơ sở hạ tầng đáng kể, nhấn mạnh ý nghĩa thực tiễn và kinh tế của lĩnh vực nghiên cứu này.

Lĩnh vực nghiên cứu về điều độ tàu vào bến trong một cảng đã được nhiều tác giả trên thế giới nghiên cứu như [1], [2]. Nếu dựa trên thuộc tính không gian, bài toán có thể được phân thành các cách bố trí bến rời rạc, bố trí bến liên tục, hoặc bố trí bến hỗn hợp. Bố trí bến rời rạc [3] là cầu cảng được chia thành một số hữu hạn các bến, mỗi bến có thể tiếp nhận một tàu tại một thời điểm. Đối với cách bố trí bến liên tục [4], tàu có thể cập bến ở bất kỳ vị trí nào dọc theo cầu cảng trong phạm vi ranh giới của nó. Phương pháp bố trí bến hỗn hợp [5] là sự kết hợp các khía cạnh của bố trí rời rạc và liên tục, cho phép sắp xếp bến linh hoạt hơn (ví dụ: các tàu nhỏ dùng chung một bến, các tàu lớn chiếm nhiều bến). Việc lựa chọn bố trí bến có ảnh hưởng đáng kể đến độ phức tạp của BAP và các loại mô hình toán học và thuật toán tối ưu hóa phù hợp nhất. Bố trí liên tục, mặc dù có khả năng sử dụng không gian tốt hơn, thường phức tạp hơn về mặt tính toán so với bố trí rời rạc. Điều này cho thấy sự đánh đổi giữa tính thực tế và lợi ích tiềm năng về hiệu quả của các mô hình liên tục so với sự đơn giản tương đối và khả năng giải quyết bằng máy tính của các mô hình rời rạc, ảnh hưởng đến trọng tâm của các dòng nghiên cứu khác nhau. Ngoài ra, nếu dựa trên thời gian tàu đến, bài toán có thể chia thành: tàu đến tĩnh [6], [7] là tất cả các tàu cần được phục vụ đã có mặt tại cảng khi bắt đầu lập lịch. Một khía cạnh khác thời gian tàu đến có thể xem là tàu đến động [8] có nghĩa là tàu đến theo thời gian và thời gian đến của chúng có thể được biết trước hoặc không chắc chắn. Phần lớn các nghiên cứu đã công bố xem xét trường hợp động. Một cách tiếp cận khác thời gian tàu đến không chắc chắn là thời gian đến không được biết chính xác và có thể tuân theo một số phân phối xác suất nhất định. Các kịch bản tàu đến động thể hiện hoạt động thực tế của cảng một cách chân thực hơn và do đó thu hút sự chú ý đáng kể của giới nghiên cứu. Sự phức tạp gia tăng của việc tàu đến động đòi hỏi các phương pháp lập lịch phức tạp hơn so với các kịch bản tĩnh. Điều này nhấn mạnh tính phù hợp thực tế của các nghiên cứu tập trung vào BAP động, vì nó nhằm giải quyết các vấn đề mà các nhà khai thác cảng phải đối mặt hàng ngày. Nhu cầu về các giải pháp mạnh mẽ có thể xử lý tính chất thay đổi theo thời gian của việc tàu đến là rất quan trọng. ☞

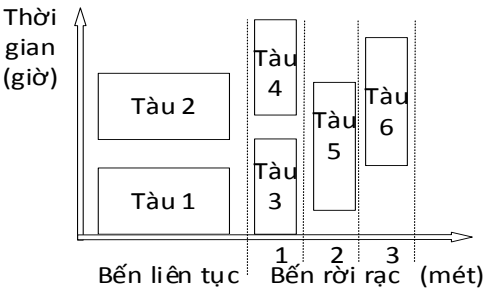
Trong nghiên cứu này, tác giả sẽ nghiên cứu bài toán điều độ tàu vào bãi khi xét bài toán động, và đối với cách chia cầu cảng là hỗn hợp. Bài toán được đề cập đến trong nghiên cứu này phù hợp với hoạt động của tàu ở bến cảng của Việt Nam, do bến cảng thông thường có chiều dài cầu cảng hạn chế, và thời gian đến của tàu có thể linh hoạt trong lúc lập lịch trình.

Trong phần kế tiếp, một mô hình toán sẽ được thiết lập. Phần 3 của bài báo giải thuật meta-heuristics được đề xuất để giải bài toán với kích thước tương đương trong thực tế với thời gian tính toán chấp nhận được. Phần 4 chính là phần thí nghiệm số để kiểm chứng mức độ hiệu quả của giải thuật được đề xuất. Cuối cùng là kết luận của bài báo.

2. BÀI TOÁN ĐIỀU ĐỘ TÀU VÀO CẦU CẢNG VÀ MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Mô tả bài toán

Trong phần này, bài toán điều độ tàu vào cầu cảng được miêu tả chi tiết. Trong bài nghiên cứu này, bài toán điều độ sẽ được mô hình dựa trên nền tảng của bài toán cutting stock 2D, đây là một bài toán NP-Hard, tức là không tồn tại một phương pháp giải xác định nào có thể giải bài toán trong thời gian tính toán tuân theo hàm đa thức khi kích thước bài toán thay đổi. Hai chiều của bài toán cutting stock được tương ứng với chiều dài và thời gian phục vụ tàu trong cảng. Thêm vào đó, bài toán này dựa trên bài toán điều độ động, tức là thời gian sẵn sàng của các tàu khác không khi lịch trình được lên. Và mô hình không gian cảng sẽ kết hợp giữa mô hình cảng rời rạc và cảng liên tục. Mô hình hybrid này cho phép tận dụng ưu điểm của cả hai cách tiếp cận: sự linh hoạt của mô hình liên tục để tối ưu hóa việc sử dụng không gian và khả năng mô hình hóa các đặc điểm cụ thể của từng vị trí bến (như loại cần cẩu, độ sâu) thông qua các đoạn rời rạc. Hình 1 thể hiện bài toán điều độ tàu vào cảng với bến cảng dạng hỗn hợp bao gồm bến liên tục, các tàu có thể neo đậu trong khoảng không gian bến, chỉ cần đảm bảo khoảng cách an toàn, và các bến rời rạc, tàu được neo đậu trong từng bến cảng được chia sẵn, chiều dài tàu phải bé hơn chiều dài của bến.



Hình 1. Bến tàu hỗn hợp

2.2. Mô hình toán bài toán điều độ tàu vào cầu cảng

Bài toán này với mục tiêu tối ưu hóa việc sắp xếp các tàu container vào cầu cảng để giảm thiểu tổng thời gian phục vụ của các tàu. Sau đây là chú thích các ký hiệu của mô hình toán:

Tập hợp:	
V=1,2,3,…,N	Tập hợp các tàu container được điều độ
K=1,2,3,…,M	Tập hợp các vị trí cầu cảng rời rạc
Tham số của tàu:	
a_i	Thời gian tàu i tới cảng (ready time), với i $\in$ V
p_i	Thời gian phục vụ tàu i, với i $\in$ V
l_i	Chiều dài của tàu i, với i $\in$ V
s_i	Thời điểm mong muốn bắt đầu phục vụ tàu i, với i $\in$ V

e_i	Thời điểm mong muốn kết thúc phục vụ tàu i, với i ∈ V
Tham số cầu cảng:	
L_{max}	Tổng chiều dài của cầu cảng liên tục
L_k	Chiều dài của vị trí cầu cảng rời rạc k, với k ∈ K
Q_k^s	Vị trí bắt đầu của cảng rời rạc k, với k ∈ K
Q_k^e	Vị trí kết thúc của cảng rời rạc k, với k ∈ K
H	Tổng thời gian lập kế hoạch
Biến quyết định:	
x_i	Vị trí cập cảng (theo chiều dọc cầu cảng) của mũi tàu i, với i ∈ V
t_i	Thời gian bắt đầu phục vụ tàu i, với i ∈ V
z_{ik}	Biến nhị phân, có giá trị 1 khi tàu i được phân vào vị trí cầu cảng rời rạc k, giá trị 0 nếu ngược lại
w_i	Biến nhị phân, giá trị 1 nếu tàu i được phân vào cầu cảng liên tục, giá trị 0 nếu ngược lại
α_{ij}, β_{ij}, γ_{ij}, δ_{ij}	Biến nhị phân phụ trợ, có giá trị 1 khi tàu i và tàu j có khả năng chồng lấn về thời gian cũng như không gian, giá trị 0 nếu ngược lại

Hàm mục tiêu:

$$\text{Min } C_{max} \quad (2.1)$$

Ràng buộc:

$$C_{max} \geq t_i + p_i, \forall i \in V \quad (2.2)$$

$$t_i \geq a_i, \forall i \in V \quad (2.3)$$

$$t_i + p_i \leq H, \forall i \in V \quad (2.4)$$

$$t_i + p_i \leq t_j + M\alpha_{ij}, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (2.5)$$

$$t_j + p_j \leq t_i + M\beta_{ij}, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (2.6)$$

$$x_i + l_i \leq x_j + M\gamma_{ij}, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (2.7)$$

$$x_j + l_j \leq x_i + M\delta_{ij}, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (2.8)$$

$$\alpha_{ij} + \beta_{ij} + \gamma_{ij} + \delta_{ij} \leq 3, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (2.9)$$

$$w_i + \sum_{k \in K} z_{ik} = 1, \forall i \in V \quad (2.10)$$

$$x_i + l_i \leq Q_k^s + M(1 - w_i), \forall i \in V, k \in K \quad (2.11)$$

$$Q_k^s - x_i \leq M(1 - z_{ik}), \forall i \in V, k \in K \quad (2.12)$$

$$x_i + l_i - Q_k^e \leq M(1 - z_{ik}), \forall i \in V, k \in K \quad (2.13)$$

$$l_i \leq L_k z_{ik} + M(1 - z_{ik}), \forall i \in V, k \in K \quad (2.14)$$

Hàm mục tiêu trong mô hình là tối thiểu thời gian hoàn thành của tất cả các tàu. Ràng buộc 2.2 thể hiện định nghĩa của thời gian hoàn thành của tàu cuối cùng. Ràng buộc 2.3 thể hiện bài toán động, tàu không thể được phục vụ trước khi nó đến bến cảng. Các ràng buộc từ 2.5 đến 2.9 nhằm tránh sự chồng lấn của các tàu về không gian và thời gian. Các ràng buộc từ 2.10 đến 2.14 là các ràng buộc về việc phân bố cầu cảng cho tàu dựa trên việc phân bố vào bến liên tục hay bến rời rạc, và các giới hạn liên quan đến chiều dài của tàu so với cầu cảng. Vì bài toán được mô hình dựa trên bài toán cutting stock 2D và đây là một bài toán NP-hard nên không có phương pháp xác định nào có thể giải được trong thời gian tính toán theo hàm đa thức. Phần kế tiếp sẽ đề xuất giải thuật local ☞

search để giải bài toán trong thời gian tính toán hợp lý.

3. GIẢI THUẬT LOCAL SEARCH

Giải thuật được đề xuất là một phương pháp tìm kiếm cục bộ (Local Search), một dạng metaheuristic, nhằm giải quyết Bài toán Điều độ Bến bãi Động (Dynamic Berth Allocation Problem - DBAP). Mục tiêu chính là tìm kiếm một lịch trình tối ưu cho việc phân bổ các tàu vào các bến cảng có sẵn sao cho tối thiểu hóa một hàm mục tiêu, cụ thể trong trường hợp này là makespan (thời điểm hoàn thành của con tàu cuối cùng).

1) Cấu trúc biểu diễn lời giải

Một lịch trình (lời giải) được biểu diễn dưới dạng một mảng số nguyên (int[]). Cấu trúc này có hai thành phần chính:

• ID Tàu: Các số nguyên dương đại diện cho mã định danh (ID) của mỗi con tàu.

• Dấu phân cách (Separator): Số 0 được sử dụng như một dấu hiệu để phân tách hàng đợi của các bến.

Ví dụ: Lời giải {8, 11, 0, 14, 48, 0, ...} có nghĩa là:

• Bến 1 sẽ phục vụ Tàu 8, sau đó đến Tàu 11.
• Bến 2 sẽ phục vụ Tàu 14, sau đó đến Tàu 48.
• Và cứ tiếp tục như vậy cho các bến còn lại.

2) Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu được sử dụng để đánh giá chất lượng của một lời giải là makespan. Giá trị này được tính bằng cách mô phỏng toàn bộ lịch trình. Giải thuật duyệt qua mảng lời giải, với mỗi tàu, nó tính toán thời gian bắt đầu phục vụ sớm nhất bằng cách lấy giá trị lớn hơn giữa thời gian tàu đến và thời gian bến sẵn sàng. Thời gian hoàn thành của tàu được tính bằng thời gian bắt đầu + thời gian xử lý. Thời gian này sau đó sẽ cập nhật lại thời gian bến sẵn sàng cho tàu tiếp theo trong hàng đợi.

3) Quy trình của Giải thuật Local Search

Giải thuật hoạt động theo một chiến lược tìm kiếm lặp đi lặp lại để cải thiện dần lời giải. Đây là một biến thể của Iterated Local Search (Tìm kiếm Cục bộ Lặp lại).

Bước 1: Khởi tạo

• Giải thuật bắt đầu bằng cách tạo ra một lời giải ban đầu hoàn toàn ngẫu nhiên nhưng hợp lệ (chứa đủ ID tất cả các tàu và số lượng dấu 0 cần thiết).

Bước 2: Tìm kiếm lân cận

• Từ lời giải hiện tại, giải thuật tạo ra các "lời giải lân cận" bằng cách thực hiện những thay đổi nhỏ. Có hai phép toán tạo lân cận chính:

- Hoán vị: Chọn ngẫu nhiên hai vị trí trong mảng và hoán đổi giá trị của chúng.

- Di chuyển: Chọn ngẫu nhiên một tàu và di chuyển nó đến một vị trí mới trong mảng.

Bước 3: Chiến lược chấp nhận và thoát khỏi tối ưu cục bộ

• Trong mỗi vòng lặp, giải thuật sẽ thử một số lượng lân cận nhất định.

• Nếu tìm thấy lân cận tốt hơn (có makespan nhỏ hơn) lời giải hiện tại, nó sẽ di chuyển đến lân cận đó.

• Nếu không tìm thấy lân cận nào tốt

hơn, tức là đang bị kẹt tại một điểm tối ưu cục bộ, giải thuật sẽ thực hiện một bước đi ngẫu nhiên (bằng cách hoán vị hoặc di chuyển) để nhảy đến một vùng không gian tìm kiếm khác. Đây là cơ chế then chốt giúp thuật toán thoát khỏi các điểm tối ưu cục bộ và có cơ hội tìm ra lời giải toàn cục tốt hơn.

• Trong suốt quá trình, giải thuật luôn lưu lại lời giải tốt nhất đã từng tìm thấy.

Bước 4: Kết thúc

• Quá trình tìm kiếm sẽ dừng lại sau khi đạt đến số vòng lặp tối đa. Lời giải tốt nhất tìm được trong toàn bộ quá trình sẽ là kết quả cuối cùng.

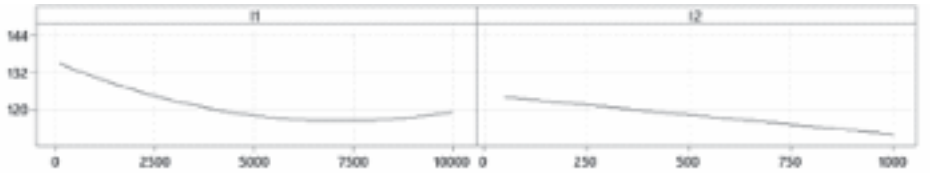
4) Thực nghiệm số

Để tìm ra bộ tham số hiệu quả nhất cho giải thuật Local Search, một loạt các thí nghiệm đã được tiến hành theo phương pháp Thiết kế Thí nghiệm (Design of Experiments - DOE). Hai tham số chính được khảo sát là: I1: Số vòng lặp tối đa (maxIterations) và I2: Số lượng lân cận được tạo và đánh giá trong mỗi vòng lặp (neighborsToTry). Với mục tiêu là tìm ra cặp (I1, I2) cho giá trị Response (đại diện cho makespan) nhỏ nhất. Dữ liệu thu thập được từ 40 lần chạy thí nghiệm đã được tổng hợp và phân tích. Bảng dưới đây tóm tắt các chỉ số thống kê quan trọng cho từng bộ tham số.

Bảng 1. Thực nghiệm xác định tham số, trên phần mềm Minitab

STT	I1	I2	Makespan	STT	I1	I2	Makespan
1	10000	1000	117	21	100	50	142
2	5050	525	116	22	5050	525	118
3	100	50	137	23	10000	1000	118
4	5050	525	117	24	100	50	174
5	10000	50	121	25	5050	525	118
6	10000	1000	115	26	10000	50	122
7	100	1000	130	27	100	1000	126
8	5050	525	118	28	100	50	147
9	100	50	131	29	5050	525	117
10	10000	50	122	30	10000	50	122
11	100	1000	122	31	100	1000	125
12	10000	1000	117	32	10000	1000	116
13	100	1000	124	33	5050	525	118
14	5050	525	117	34	5050	525	118
15	100	50	140	35	100	525	127
16	10000	50	122	36	5050	525	118
17	10000	1000	117	37	5050	525	117
18	100	1000	128	38	10000	525	118
19	5050	525	118	39	5050	50	125
20	10000	50	123	40	5050	1000	117

Qua quá trình phân tích quy hoạch thực nghiệm, điểm tối ưu đối với I1 là 6200 và I2 là 1000.



Hình 2. Đồ thị các nhân tố chính khi quy hoạch

Trong bảng 2 là 15 trường hợp kích thước khác nhau của bài toán với kích thước tương đương trong thực tế, giải thuật được thực hiện trên máy tính Windows 11, với ngôn ngữ lập trình Java, CPU Core™ i7 – 10750H. Ứng với mỗi bài toán, việc tính toán bằng giải thuật được lập lại 20 lần để thống kê. Kết quả cho thấy giải thuật đạt độ ổn định do độ lệch chuẩn nhỏ và thời gian tính toán chấp nhận được.

Bảng 2. Chạy thực nghiệm số

STT	Số tàu	Số bến	Giá trị makespan ban đầu trung bình	Giá trị makespan sau khi giải trung bình	Độ lệch chuẩn của makespan sau khi giải	Trung bình thời gian tính toán (giây)
1	10	4	91	31	0.0	3.12
2	15	4	109	53	0.0	4.74
3	20	8	101	43	0.0	5.44
4	25	8	155	46	0.5	7.46
5	30	8	163	56	0.3	7.58
6	35	8	170	62	0.4	8.90
7	40	10	207	58	0.5	9.22
8	45	10	189	64	0.6	10.39
9	50	10	244	70	0.6	12.07
10	55	10	243	77	0.6	12.65
11	60	10	245	82	0.7	12.96
12	65	10	253	89	0.6	13.58
13	70	12	277	81	0.6	14.65
14	75	12	226	87	0.7	15.92
15	80	12	299	94	0.7	16.72

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu về việc điều độ tàu vào bến, với giả thuyết bến hỗn hợp, bao gồm phần bến liên tục và bến rời rạc. Mô hình toán đã được lập và một giải thuật meta-heuristics được đề xuất để giải quyết bài toán với thời gian tính toán hợp lý. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm đã được sử dụng để tìm được tham số tối ưu cho giải thuật là số vòng lặp để tìm kiếm nghiệm là 6200 và số lần cần tìm kiếm lời giải lân cận trước khi cập nhật lời giải hiện hành nên là 1000 lần. Các vấn đề với kích thước khác nhau đã được đưa ra để kiểm chứng độ ổn định và tốc độ tính toán của giải thuật. ❖

Ngày nhận bài: **16/5/2025**
Ngày phản biện: **09/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. M. M. Golias, M. Boile, and S. Theofanis, "*A lamda-optimal based heuristic for the berth scheduling problem*". Transportation Research Part C, vol. 18, pp. 794-806, 2010.

[2]. K. H. Kim and K. T. Park, "*A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers*". European Journal of Operational Research, vol. 148, pp. 92-101, 2003.

[3]. K. Buhrkal, S. Zuglian, S. Ropke, J. Larsen, and R. M. Lusby, "*Models for the Discrete Berth Allocation Problem: A Computational Comparison*". DTU Management, Rep. 14, 2009.

[4]. P. Frojan, J. F. Correcher, R. Alvarez-Valdes, G. Koulouris, and J. M. Tamarit, "*The continuous Berth Allocation Problem in a container terminal with multiple quays*". Expert Systems with Applications, 2015.

[5]. E. T. Bacalhau, L. Casacio, and A. T. de Azevedo, "*New hybrid genetic algorithms to solve dynamic berth allocation problem*". Expert Systems with Applications, vol. 167, p. 114198, 2021.

[6]. D. Chang, Z. Jiang, W. Yan, and J. He, "*Integrating berth allocation and quay crane assignments*. Transportation Research Part E, vol. 46, pp. 975-990, 2010.

[7]. A. Imai, E. Nishimura, and S. Papadimitriou, "*Marine container terminal configurations for efficient handling of mega-containerships*". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 49, pp. 141-158, Jan. 2013.

[8]. B. Lu, S. Hao, M. Zhao, and H. Wang, "*Dynamic berth allocation problem for a novel hybrid berth system in container terminal*". SSRN, 2022. [Online]. Available: https://ssrn.com/abstract=4205029

THIẾT KẾ THIẾT BỊ HỖ TRỢ ĐIỀU TRỊ PHỤC HỒI CHỨC NĂNG CHI TRÊN VÀ CHI DƯỚI CHO BỆNH NHÂN SAU ĐỘT QUỴ NÃO

DESIGN OF A REHABILITATION DEVICE OF UPPER AND LOWER LIMBS FOR POST STROKE PATIENT

Lê Hoàng Bảo[1], Trần Nguyên Duy Phương[1], Nguyễn Văn Thành[1], Trương Quốc Thanh[1], Đinh Trường Hoàng Vinh[2]

[1]Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[2]Công ty TNHH Công nghệ Cơ khí Việt Nam

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế cơ khí của thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng vận động chi trên và chi dưới cho bệnh nhân sau đột quỵ não. Số bậc tự do liên quan với các chuyển động chính của thiết bị là 14, gồm 5 bậc tự do ở mỗi cánh tay và 2 bậc tự do ở mỗi chân. Thiết bị cho phép triển khai độc lập hoặc đồng thời các bài tập phục hồi chức năng chi trên và chi dưới ở tư thế nằm. Thiết bị có cấu trúc cơ khí linh hoạt với khả năng điều chỉnh kích thước nhằm đảm bảo phù hợp nhất với thể hình bệnh nhân.

Từ khóa: *Phục hồi chức năng; Chi trên và chi dưới; Đột quỵ; 14 bậc tự do.*

ABSTRACT

The paper presents the mechanical design of the device to assist in the treatment of upper limb and lower limb motor rehabilitation for post-stroke patients. The number of degrees of freedom associated with the main movements of the device is 14, including 5 degrees of freedom in each arm and 2 degrees of freedom in each leg. The device allows the independent or simultaneous implementation of upper and lower limb rehabilitation exercises in a lying position. The device has a flexible mechanical structure with the ability to adjust the links to ensure a suitable fit for the patient's limbs.

Keywords: *Rehabilitation; Upper and lower limbs; Stroke; 14-dof.*

1. GIỚI THIỆU

Thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng ngày nay đang được sử dụng rất phổ biến tại các bệnh viện, cơ sở y tế, thậm chí tại gia đình bệnh nhân. Đây là một thiết bị hỗ trợ người bệnh tập các bài tập vật lý trị liệu giúp người bệnh cải thiện thể trạng và khôi phục khả năng vận động sau quá trình điều trị. Các thiết bị này được sử dụng cho bệnh nhân trong giai đoạn hồi phục sau tai nạn, chấn thương nghiêm trọng, phẫu thuật điều trị y tế, đột quỵ, bại não hoặc tổn thương thần kinh.

Hiện nay, có hai loại thiết bị phổ biến để phục hồi chức năng cho bệnh nhân là: thiết bị phục hồi chức năng chi trên và thiết bị phục hồi chức năng chi dưới. Ngoài ra, còn có thiết bị kết hợp được cả phục hồi chức năng chi trên và chi dưới (Bảng 1). Tuy nhiên, các loại thiết bị này hiện nay chưa thể hỗ trợ đầy đủ bậc tự do cần thiết cho cả chi trên lẫn chi dưới.

Để khắc phục các hạn chế trên, bài báo này tập trung thiết kế bộ khung cơ khí của thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng chi trên và chi dưới cho bệnh nhân sau đột quỵ não. Thiết bị có các ưu điểm như sau: có giường giúp bệnh nhân có thể vừa nằm vừa tập, giường có thể nâng hạ hỗ trợ quá trình tập luyện và chăm sóc, có thể tập được nhiều bài tập, có thể tập kết hợp chi trên và chi dưới.

Bảng 1. Một số thiết bị phục hồi chức năng chi trên và chi dưới

		
BTS ANYMOV [2]	YEECON AI-3 [3]	ZEPU X8 [4]

2. THIẾT KẾ

2.1. Tổng quan thiết bị

Thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng chi trên và chi dưới cho bệnh nhân sau đột quỵ não (Hình 1) được phát triển từ thiết kế "Lower Limb Rehabilitation Training Component for Bedridden Stroke Patients" [1] là một thiết bị phù hợp với bệnh nhân thuộc dạng tập bị động. Thiết bị bao gồm 14 bậc tự do với 3 phần chính: phần khung, cụm tập chi trên, cụm tập chi dưới.

- Phần khung: Có thể nâng hạ, nâng nghiêng.

- Cụm tập chi trên: Có 5 bậc tự do mô phỏng lại chuyển động của khớp vai và các khớp tay.

- Cụm tập chi dưới: Có 2 bậc tự do mô phỏng lại chuyển động khớp háng và khớp cổ chân.

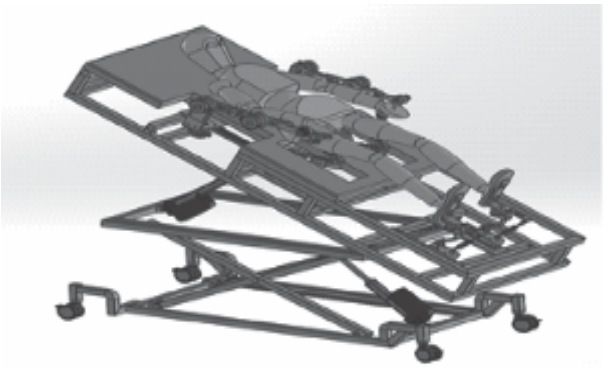
Thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng chi trên và chi dưới cho bệnh nhân sau đột quỵ não sử dụng bộ khung được nâng, hạ bởi xy lanh điện với các khớp được dẫn động bằng động cơ điện không chổi than (Maxon) và hộp giảm tốc sóng (Harmonic Drive) với những ưu điểm phù hợp với yêu cầu của thiết bị:

+ Linak Linear actuators LA36;

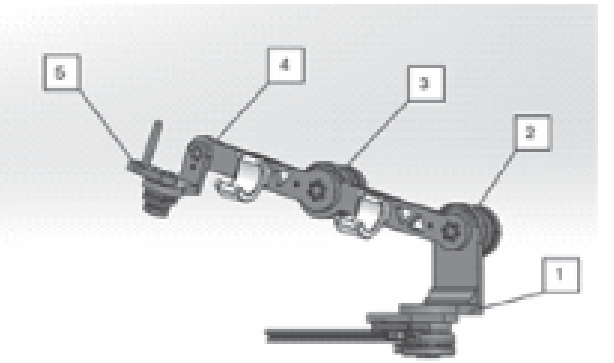
+ Maxon EC 45 flat, brushless, 30 watt và EC 90 flat, brushless, 90 watt;

+ Harmonic drive CFS-11-50-2XH-F và CFS-17-120-2UH.

☞



Hình 1. Thiết kế 3D của thiết bị



Hình 2. Các khớp của cụm tập chi trên

2.2. Cụm tập chi trên

Cụm tập chi trên đáp ứng với chức năng vận động chi trên với 5 chuyển động (Hình 2) được thực hiện qua các khớp: khớp cổ tay, khớp khuỷu tay. Mô phỏng lại các chức năng của cánh tay con người.

Khớp vai có 2 bậc tự do bao gồm các chuyển động: dang - khép, xoay ngoài - xoay trong. Các chuyển động này sẽ tương ứng với khớp 1 và 2.

Khớp khuỷu tay có 1 bậc tự do: gấp - duỗi. Chuyển động này tương ứng với khớp 3.

Khớp cổ tay có 2 bậc tự do, đó là: gấp - duỗi, lắc trái - lắc phải. Hai chuyển động này tương ứng với khớp 4 và 5.

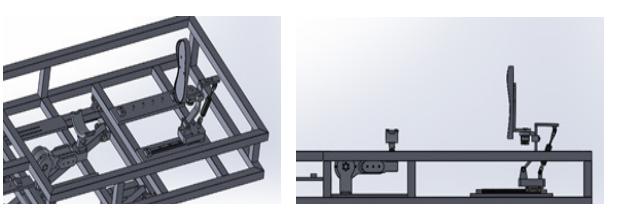
Thiết bị có thể tùy chỉnh chế độ tập luyện, có thể tập luyện một tay hoặc đồng thời cả hai tay. Ngoài ra, hệ thống cho phép điều chỉnh kích thước để phù hợp với thể trạng của từng người tập.

Nhờ thiết kế tối ưu với hệ thống truyền động chính xác, thiết bị này giúp bệnh nhân thực hiện các bài tập nhịp nhàng, hỗ trợ quá trình phục hồi hiệu quả và rút ngắn thời gian điều trị.

2.3. Cụm tập chi dưới

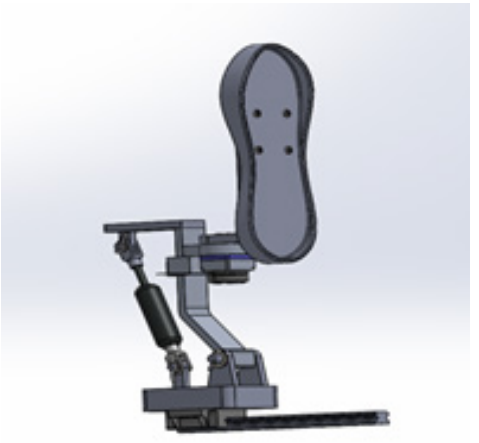
Cụm tập chi dưới (Hình 3) bao gồm: cụm nâng đùi (Hình 4) và cụm bàn chân (Hình 5) kết hợp với nhau mô phỏng hoạt động gấp - duỗi của cụm khớp háng, và lật sấp - lật ngửa của khớp cổ chân. Trong đó, cụm nâng đùi sẽ đóng vai trò chính trong hoạt động gấp - duỗi của cụm khớp háng khi thực hiện động tác này. Không chỉ khớp háng mà khớp gối và khớp cổ chân cũng tham gia vào quá trình vận động. Cụm bàn chân hoạt động như một bộ phận đỡ, giúp cố định và hỗ trợ bàn chân trong quá trình tập luyện.

Đồng thời, cụm này cũng thực hiện chuyển động lật sấp - lật ngửa của khớp cổ chân, giúp cải thiện sự linh hoạt và kiểm soát của bàn chân. Đảm bảo bệnh nhân có thể tập luyện an toàn và hiệu quả.

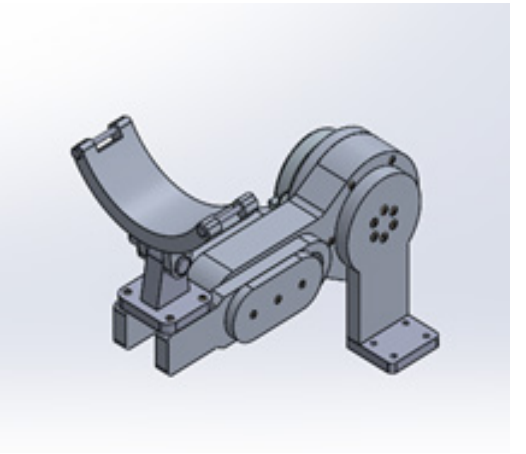


Hình 3. Thiết kế cụm tập chi dưới

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

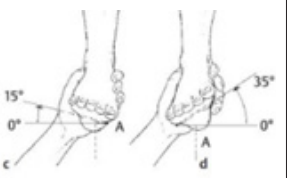


Hình 4. Thiết kế cụm bàn chân

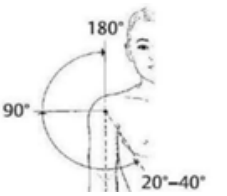
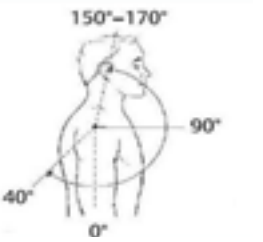
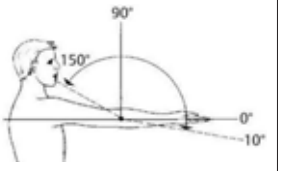
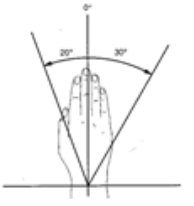
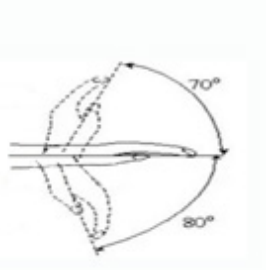


Hình 5. Thiết kế cụm nâng đùi

Bảng 2. Bảng đo tầm vận động của các khớp chi dưới [5]

STT	Loại khớp	Cụm tương ứng của máy	Loại vận động	Tầm vận động cơ thể	Tầm vận động tương ứng của máy	Hình ảnh minh họa
1	Khớp háng	Cụm nâng đùi	Dạng -Khép	130° –140°	45°	
2	Khớp cổ chân	Cụm bàn chân	Lật sấp - Lật ngửa	15° – 0° – 35°	10° – 0° – 30°	

Bảng 3. Bảng đo tầm vận động của các khớp chi trên [6]

STT	Loại khớp	Khớp tương ứng của máy	Loại vận động	Tầm vận động cơ thể	Tầm vận động tương ứng của máy	Hình ảnh minh họa
1	Khớp vai	Khớp 1	Dạng - Khép	180° – 0° 20° – 40°	90° – 0°	
2	Khớp vai	Khớp 2	Đưa trước - Đưa sau	40° – 0° 150° – 170°	15° – 165°	
3	Khớp khuỷu	Khớp 3	Gấp - Duỗi	0° – 150°	0° – 145°	
4	Khớp cổ tay	Khớp 4	Nghiêng quay - Nghiêng trụ	30° – 0° – 20°	25° – 0° – 15°	
5	Khớp cổ tay	Khớp 5	Gấp -Duỗi	80° – 0° – 70°	75° – 0° – 65°	

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Bảng 2 và Bảng 3 trình bày về tầm vận động của máy đạt được so với tầm vận động tương ứng của các khớp của cơ thể. Thiết bị được thiết kế để đảm bảo an toàn, kiểm soát tiến độ phục hồi và phù hợp với khả năng vận động hạn chế của người bệnh, do đó không cần tầm vận động tối đa như khớp sinh lý bình thường.

3. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày thiết kế của thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng cho chi trên và chi dưới. Thiết bị có tổng cộng 14 bậc tự do với chế độ hoạt động độc lập hoặc đồng thời, cho phép mô phỏng tốt nhất các chuyển động cần thiết của các bài tập. Thiết bị có tính linh hoạt với cơ chế điều chỉnh độ dài các khâu để đảm bảo phù hợp nhất cho từng bệnh nhân.❖

Ngày nhận bài: **01/4/2025**
Ngày phản biện: **15/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Wang, X.; Feng, Y.; Zhang, J.; Li, Y.; Niu, J.; Yang, Y.; Wang, H. "*Design and Analysis of a Lower Limb Rehabilitation Training Component for Bedridden Stroke Patients*". In Machines 2021, 9, 224.

[2]. BTS ANYMOV, accessed: March, 30, 2025, [online], available from: https://industry.hospitals-management.com/suppliers/bts/productspec/1490939217-btsanymov.pdf.

[3]. "*A1-3 Lower Limb Intelligent Feedback & Training System*", Accessed: March. 30, 2025, available from: https://www.yikangmedical.com/lower-limb-intelligent-feedback-training-system-a1-3.html

[4]. "*ZEPU-X8 Lower Extremity Feedback Training and Evaluation System by Zepu*", accessed: March, 30, 2025, [online], available from : https://www.bostonorthoresp.com/ZEPU-X8-Lower-Extremity-Feedback-Training-and-Evaluation-System-by-Zepu_p_10779.html.

[5]. "*Khám khớp háng*". Phần 1: Các bước cơ bản. accessed: March, 30, 2025, [online], available from : https://phcn-online.com/2021/05/28/kham-khop-hang-p1/

[6]. Catrin Buol, "*Rehabilitation der traumatischen anteriore Schulterluxation*". Institut für Physiotherapie, Gesundheit, Seite 12 von 49, 2011.

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀO HỆ THỐNG TREO BÁN TÍCH CỰC NHẰM NÂNG CAO ĐỘ ÊM DỊU CỦA Ô TÔ

RESEARCH ON THE APPLICATION OF PID CONTROLLER IN SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEM TO IMPROVE THE RIDE COMFORT OF THE VEHICLE

Lê Bảo Việt[1], Nguyễn Tiến Dũng[1,*], Vũ Đình Hoan[1], Nguyễn Đình Dương[1], Trương Văn Thuận[2]

[1]Khoa Cơ khí Động lực, Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

[2]Khoa Kỹ thuật Ô tô và Năng lượng, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa

**Email: dung.nguyentien@hust.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một nghiên cứu về ứng dụng của bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) vào hệ thống treo bán tích cực với mục đích cải thiện hiệu suất dao động của ô tô. Hệ thống treo bán tích cực được trình bày trong nghiên cứu này có thể thay đổi lực cản của phần tử giảm chấn bằng cách thay đổi cường độ từ trường xuyên qua nó. Một mô hình dao động một phần tư xe đã được xây dựng để mô phỏng dao động theo phương thẳng đứng của ô tô khi đi trên đường. Nghiên cứu đã tiến hành áp dụng bộ điều khiển PID để điều khiển lực cản giảm chấn nhằm cải thiện độ êm dịu cho xe khi di chuyển. Nhóm tác giả đã tiến hành mô phỏng, đánh giá dao động của xe khi di chuyển với điều kiện mấp mô mặt đường loại B-C theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016. Kết quả thu được khi mô phỏng dao động với hệ thống treo không có điều khiển sẽ được mang đi so sánh với hệ thống treo có điều khiển. Kết quả chứng minh rằng hệ thống treo bán tích cực được điều khiển bằng bộ điều khiển PID có vận tốc, gia tốc và chuyển vị của thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện rõ rệt khi so sánh với hệ thống treo thụ động trong cùng điều kiện vận hành. Nghiên cứu này xác nhận hiệu quả của phương pháp điều khiển PID trong việc cải thiện chất lượng lái xe và đặt nền tảng cho việc phát triển thêm các thuật toán điều khiển tiên tiến cho hệ thống treo xe.

Từ khóa: *Hệ thống treo bán tích cực; Bộ điều khiển PID; Hệ thống treo thụ động.*

ABSTRACT

This paper presents a study on the application of a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller to a semi-active suspension system to improve the vibration performance of the car. The semi-active suspension system presented in this study can change the resistance of the damper element by changing the magnetic field intensity through it. A quarter-vehicle vibration model was built to simulate the vertical vibration of the car when traveling on the road. The study applied PID controller to control the damper resistance to improve the smoothness of the car when moving. The authors simulated and evaluated the vibration of the car when moving on the bumpy road surface type B-C according to ISO 8608:2016 standard. The results obtained when simulating vibration

with the uncontrolled suspension system will be compared with the controlled suspension system. The results demonstrate that the semi-active suspension system controlled by a PID controller has significantly improved vehicle velocity, acceleration, and vertical displacement when compared with the passive suspension system under the same operating conditions. This study confirms the effectiveness of the PID control method in improving the ride quality and lays the foundation for further development of advanced control algorithms for vehicle suspension systems.

Keywords: *Semi-active suspension systems; PID controller; Passive suspension.*

1. TỔNG QUAN

Hệ thống treo đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ êm dịu, độ ổn định và khả năng điều khiển của xe trong quá trình vận hành. Hệ thống treo không chỉ giúp đảm bảo êm dịu mà còn ảnh hưởng rất lớn đến tính ổn định của xe khi chuyển làn đường cũng như khả năng tương tác giữa bánh xe và mặt đường [1]. Trong những năm gần đây, việc nghiên cứu và phát triển các hệ thống treo thông minh như hệ thống treo bán tích cực (semi-active suspension) đã thu hút sự quan tâm đáng kể trong lĩnh vực kỹ thuật ô tô. Khác với hệ thống treo thụ động truyền thống, hệ thống treo bán tích cực cho phép điều chỉnh hệ số cản giảm chấn một cách linh hoạt tùy theo điều kiện mặt đường và trạng thái vận hành của xe, từ đó cải thiện đáng kể khả năng giảm rung và độ ổn định thân xe [2].

Một trong những phương pháp điều khiển được áp dụng rộng rãi trong việc điều khiển hệ thống treo là bộ điều khiển PID (Proportional – Integral – Derivative). Đây là một phương pháp đạt hiệu quả cao nhờ vào cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và có khả năng hiệu chỉnh thông số linh hoạt. Bộ điều khiển PID giảm thiểu dao động và lực tác dụng lên thân xe, qua đó nâng cao độ êm dịu của xe mà không làm ảnh hưởng đến độ ổn định [3].

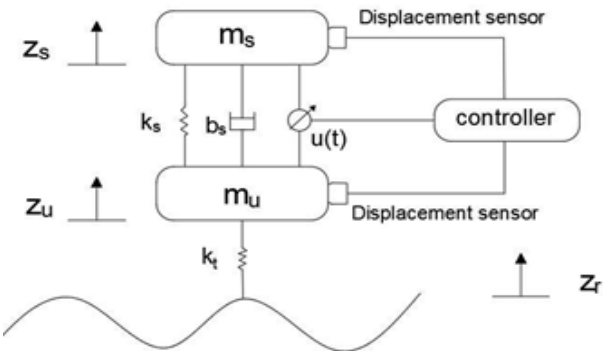
Trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về chất lượng vận hành và sự thoải mái cho người sử dụng, các nhà sản xuất ô tô đang không ngừng cải tiến hệ thống treo thông qua các thuật toán điều khiển hiện đại [4]. Tuy nhiên, chi phí và tính phức tạp của hệ thống treo tích cực hoàn toàn (active suspension) khiến hệ thống bán tích cực trở thành lựa chọn tối ưu về mặt hiệu quả chi phí và kỹ thuật [5]. Do đó, việc nghiên cứu và ứng dụng các bộ điều khiển như PID trong hệ thống treo bán tích cực là hướng đi phù hợp, đáp ứng cả yêu cầu kỹ thuật và kinh tế trong thực tế sản xuất và sử dụng xe.

Mục tiêu của nghiên cứu này là xây dựng một mô hình hệ thống treo bán tích cực sử dụng bộ điều khiển PID để đánh giá khả năng cải thiện độ êm dịu của xe thông qua mô phỏng trên nền tảng mô phỏng số. Kết quả thu được sẽ được so sánh với hệ thống treo thụ động nhằm làm rõ hiệu quả của giải pháp điều khiển được đề xuất.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH DAO ĐỘNG CỦA XE

Nghiên cứu này đã tiến hành xây dựng một mô hình dao động ¼ xe để mô phỏng và đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển. Do đặc điểm đơn giản và dễ mô phỏng nên mô hình ¼ xe cho phép đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển một cách trực quan và chính xác.

☞



Hình 1. Mô hình hệ thống treo bán tích cực ¼

Trong hình 1 là mô hình dao động ¼ xe, trong đó: khối lượng được treo ký hiệu là m_s; trong trường hợp này, m_s sẽ bằng ¼ tổng khối lượng thân xe. Chuyển vị theo phương thẳng đứng của thân xe được biểu thị bằng z_s. Khối lượng không treo được ký hiệu là m_u, đại diện cho khối lượng của bánh xe và các cơ cấu lắp trên bánh xe. Chuyển vị theo phương thẳng đứng của khối lượng không được treo được kí hiệu là z_u. Hệ thống treo được mô hình hóa bằng cách sử dụng tổ hợp lò xo và giảm chấn độ cứng của lò xo và hệ số cản giảm chấn được kí hiệu lần lượt là k_s và b_s. Biên dạng đường đường được kí hiệu là z_r. Lốp có độ cứng nhưng khả năng giảm chấn rất nhỏ và được coi bằng 0, độ cứng của lốp được ký hiệu là k_t; u(t) là lực điều khiển của hệ thống treo, lực này được bộ điều khiển đưa ra. Bộ giảm chấn MR bao gồm, lực ma sát và lực giảm chấn có thể điều khiển được, được biểu thị bằng u(t).

Dựa vào định luật Newton – Euler và mô hình ở hình 1, các phương trình vi phân mô tả dao động của xe được biểu diễn như sau:

$$m_s\ddot{z}_s = k_s(z_u - z_s) + b_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + u \quad (1)$$

$$m_u\ddot{z}_u = -k_s(z_u - z_s) - b_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + k_t(z_r - z_u) - u \quad (2)$$

Trong quá trình thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn phương pháp mô hình hóa không gian trạng thái để biểu diễn động học hệ thống. Phương pháp này cho phép chuyển đổi các phương trình vi phân bậc hai thành hệ phương trình vi phân bậc nhất, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho việc phân tích và tổng hợp điều khiển. Mô hình không gian trạng thái đã được chứng minh là hiệu quả và được sử dụng phổ biến trong nhiều nghiên cứu quốc tế. Việc lựa chọn các biến trạng thái phụ thuộc vào mục tiêu thiết kế và cách tiếp cận của người thực hiện. Các biến này cần thể hiện được các đặc trưng động lực học quan trọng của hệ thống cũng như đáp ứng yêu cầu quan sát hoặc điều khiển. Trong nghiên cứu này, các biến trong phương trình vi phân mô tả hệ thống treo được chọn lọc và tổ chức thành véctơ trạng thái một cách hợp lý nhằm đảm bảo mô hình hóa chính xác hành vi của hệ thống. Từ các phương trình (1) và (2), mô hình không gian trạng thái của hệ thống có thể được biểu diễn dưới dạng tổng quát như sau:

$$\dot{X}(t) = A*X(t) + B*u(t) + L*z_r(t) \quad (3)$$

Trong đó, A là ma trận hệ số không đổi n*n và n bằng số trạng thái; B và L là véctơ n*1 hệ số không đổi; X(t) là trạng thái và là véctơ n*1; u(t) là lực điều khiển, là đầu vào giá trị vô hướng; $x_r(t)$ là mặt cắt đường là giá trị vô hướng. Phương trình (3) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \ddot{z}_s \\ \dot{z}_u \\ \ddot{z}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{-k_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{-k_t-k_s}{m_u} & \frac{-k_s}{m_u} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} z_s \\ \dot{z}_s \\ z_u \\ \dot{z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{-1}{m_u} & \frac{k_t}{m_u} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_t \\ z_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. KÍCH THƯỚC MẤP MÔ MẶT ĐƯỜNG

ISO 8608: 2016 là tiêu chuẩn được sử

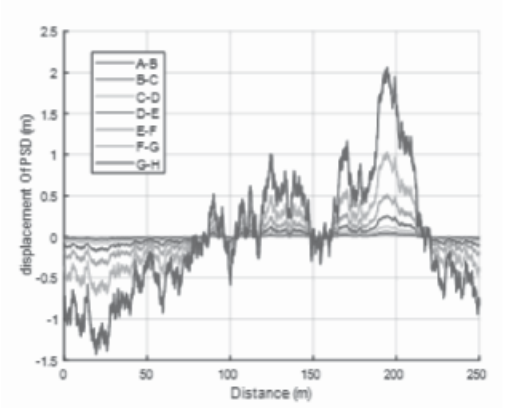
dụng phổ biến nhất hiện nay trong các tính toán động lực học ô tô. Tiêu chuẩn này phân biệt các dạng đường theo mật độ phổ công suất (PSD) và chia chúng thành 8 loại với ký hiệu quy ước từ A đến H [6].

$$h(x) = \sum_{i=0}^{N} \sqrt{\Delta n}.2^{k}.10^{-3}.\left(\frac{n_0}{i\Delta n}\right).\cos(2\pi.i.\Delta n.x + \varphi_i) \quad (5)$$

Công thức (5) cho phép tính toán và vẽ đồ thị mô tả chiều cao mấp mô mặt đường theo dịch chuyển x. Hàm h(x) sẽ được sử dụng làm hàm kích thích trong mô hình chuyển động tổng quát của ô tô với các loại đường khác nhau. Nếu coi ô tô chuyển động đều với vận tốc v thì biểu thức tính độ cao mấp mô theo biến x có thể viết lại theo biến thời gian t như sau:

$$h(t)=\sum_{i=0}^{N} \sqrt{\Delta n}.2^{k}.10^{-3}.\left(\frac{n_0}{i\Delta n}\right).\cos(2\pi.i.\Delta n.V.t+\varphi_i) \quad (6)$$

Mấp mô bề mặt của các loại đường theo ISO 8608:2016 được thể hiện trên 1 khoảng chiều dài 200m trên hình 2. Trong nghiên cứu này, 4 loại đường theo ISO 8608:2016 đã được thử nghiệm, bao gồm: loại đường B-C (đường tốt), đường C-D (đường trung bình), đường D-E (đường xấu) và đường E-F (đường rất xấu) được khảo sát.



Hình 2. Mấp mô mặt đường theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016

4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID

Mục tiêu của hệ thống điều khiển là xác định lực giảm chấn tối ưu trong giới hạn làm việc của bộ giảm chấn từ (MR), nhằm cải thiện hiệu suất giảm dao động cho khối lượng được treo. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả áp dụng bộ điều khiển PID (Proportional–Integral–Derivative), một phương pháp điều khiển cổ điển phổ biến với cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và có khả năng đáp ứng tốt với nhiều điều kiện vận hành.

Bộ điều khiển PID hoạt động dựa trên ba thành phần: thành phần tỷ lệ (P) phản ứng nhanh với sai lệch tức thời, thành phần tích phân (I) giúp loại bỏ sai lệch ổn định, và thành phần vi phân (D) cải thiện phản ứng nhanh và giảm dao động. Tín hiệu điều khiển được tính theo biểu thức:

$$u(t) = -K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Trong đó, e(t) là sai số giữa đầu vào mong muốn và phản hồi hệ thống, K_p, K_i, K_d lần lượt là hệ số khuếch đại của các thành phần P, I, và D. Quá trình điều chỉnh các thông số PID (K_p, K_i, K_d) đóng vai trò then chốt trong việc đạt được hiệu năng tối ưu của hệ thống điều khiển. Các hệ số này được tinh chỉnh thông qua mô phỏng, nhằm đảm bảo hệ thống đạt được các mục tiêu về độ ổn định, thời gian quá độ, và mức độ giảm rung của khối lượng được treo.

Trong nghiên cứu này, hệ thống treo được tuyến tính hóa tại từng vùng vận tốc làm việc. Ở mỗi vùng, bộ điều khiển PID được điều chỉnh để phù hợp với đặc tính động học của hệ thống tương ứng. Việc lựa chọn giá trị PID được thực hiện bằng phương pháp thử nghiệm thông qua mô phỏng trên môi trường MATLAB/ Simulink. Các tiêu chí như giảm thiểu biên độ ☞

dao động, rút ngắn thời gian quá độ, và giới hạn độ vọt lố được sử dụng để đánh giá hiệu quả điều khiển. Các thông số của hệ thống dùng trong mô phỏng được trình bày trong bảng 1.

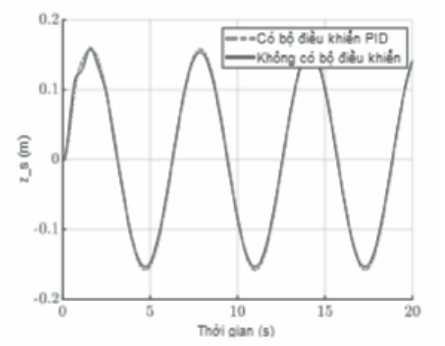
Bảng 1. Thông số của bộ điều khiển PID

Control variable	K_p	K_i	K_d
$Z - \zeta_1$	-28.3762	53802.3547	3435.782
$\ddot{Z}$	126.2147	2667.58116019004	0

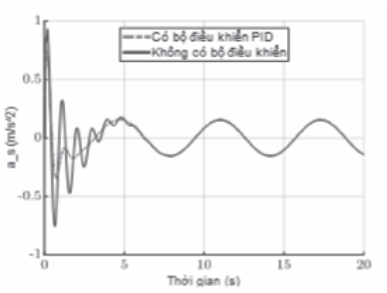
Sau khi xác định xong thông số đầu vào của bộ điều khiển PID, nhóm tác giả tiến hành chạy chương trình mô phỏng hệ thống treo ¼ với thông số đầu vào: m_s bằng 450 kg, m_u bằng 48 kg, k_s bằng 26500 N.m, k_t bằng 175000 N.m và b_s bằng 1200 N.s/m.

5. KẾT QUẢ KHẢO SÁT

Nhóm tác giả đã tiến hành mô phỏng hoạt động của hệ thống treo bán tích cực trên phần mềm mô phỏng số, đồng thời nhóm nghiên cứu đã tiến hành khảo sát và so sánh chất lượng dao động của hai hệ thống treo thụ động thông thường và treo bán tích cực trên các loại mặt đường khác nhau như: đường mấp mô hình sin, đường loại B-C theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016, với vận tốc di chuyển của xe là 40 (km/h).



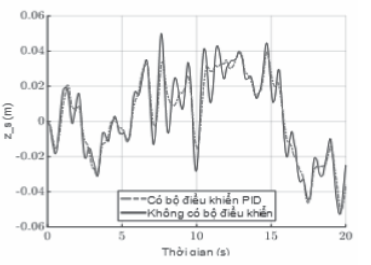
(a)



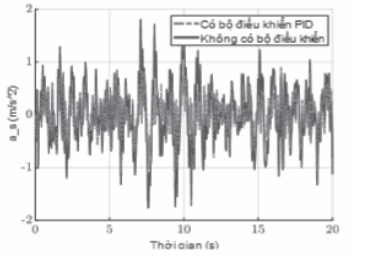
(b)

Hình 3. Dao động của ô tô khi di chuyển trên mặt đường mấp mô hình Sin:
a) Chuyển vị theo phương thẳng đứng của thân xe,
b) Gia tốc theo phương thẳng đứng của thân xe

Kết quả trên hình 3 cho thấy khi đi trên mặt đường mấp mô hình sin có chiều cao mấp mô là 0.08 m thì hệ thống treo bán tích cực được ứng dụng bộ điều khiển LQR cho thấy dao động và gia tốc thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện, đặc biệt là với phần gia tốc thân xe, ở 5 giây đầu của mô phỏng gia tốc thân xe đã được cải thiện rõ rệt.



(a)



(b)

Hình 4. Dao động của ô tô khi di chuyển trên mặt đường mấp mô dạng B-C:
a) Chuyển vị theo phương thẳng đứng của thân xe,
b) Gia tốc theo phương thẳng đứng của thân xe

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Kết quả trên hình 4 cho thấy khi đi trên mặt đường mấp mô dạng B-C thì hệ thống treo bán tích cực được ứng dụng bộ điều khiển PID cho thấy biên độ dao động và gia tốc thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện rõ rệt, cho phép nhóm tác giả có cơ sở để triển khai các nghiên cứu tiếp theo. Ở giây thứ 10 trong kết quả mô phỏng hình 4a cho thấy cả biên độ dao động và gia tốc đều có sự cải thiện rõ rệt (khoảng 15%) so với hệ thống treo thường.

6. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình động lực học cho hệ thống treo một phần tư (1/4 xe) và triển khai thành công bộ điều khiển PID để điều khiển lực giảm chấn của hệ thống treo bán chủ động sử dụng giảm chấn từ (MR). Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển PID có khả năng cải thiện đáng kể độ êm dịu và chất lượng dao động của xe so với hệ thống treo thụ động truyền thống. Các thông số điều khiển có thể được hiệu chỉnh linh hoạt để đáp ứng các tiêu chí hiệu suất khác nhau trong từng điều kiện vận hành cụ thể. Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng để nhóm tác giả tiếp tục phát triển và tối ưu hóa các phương pháp điều khiển hệ thống treo bán chủ động trong các nghiên cứu tiếp theo. Đồng thời, đây cũng là tiền đề để áp dụng bộ điều khiển PID trong các hệ thống thực tế, hướng tới việc nâng cao chất lượng vận hành và độ thoải mái cho hành khách trên các phương tiện giao thông hiện đại.❖

Ngày nhận bài: **20/5/2025**
Ngày phản biện: **05/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Tiến Dũng, Lê Bảo Việt, Trần Đình Tuấn, Dương Ngọc Khánh, "*Nghiên cứu ổn định quỹ đạo chuyển động của ô tô điện cỡ nhỏ khi chuyển làn đường*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, ISSN 2815-5505, số 316, tháng 6 năm 2024.

[2]. Lê Bảo Việt, Nguyễn Tiến Dũng, Trịnh Minh Hoàng, "*Nghiên cứu ứng dụng bộ điều khiển LQR vào hệ thống treo bán tích cực*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, ISSN 2815-5505, số 316, tháng 6 năm 2024.

[3]. Behnam Riazi, 2021, "*Design and Investigation of a Semi-Active Suspension System in Automotive Applications*". Doctoral thesis, University of Windsor, Canada.

[4]. Nguyen Tien Dung, Bui Van Cuong, Le Van Quynh, Ngo Van Dung, Vu Tran Hoang, "*Evaluation of ride performance of PID controller in active suspension systems for an electric vehicle*". 71st International Conference on Vibroengineering in Riga, Latvia, December 12-13 (2024).

[5]. Nguyen Tien Dung, Bui Van Cuong, Le Van Quynh, Hoang Anh Tan, "*Optimization of electric vehicle suspension parameters using improved artificial fish swarm algorithm*". Journal of Military Science and Technology, 10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.191-197 (2024).

[6]. Tiêu chuẩn ISO 8608:2016.

NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH BIẾN DẠNG TẠO LỖ TRÊN THÂN ỐNG HÌNH TRỤ PHỤC VỤ LIÊN KẾT HÀN ỐNG RẼ NHÁNH

STUDY ON THE DEFORMATION PROCESS OF HOLE FORMATION ON CYLINDRICAL PIPE BODIES FOR BRANCH PIPE WELDING CONNECTIONS

Nguyễn Văn Quang, Phạm Sơn Minh, Quách Văn Thiêm, Nguyễn Văn Mang*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 2390413@student.hcmute.edu.vn; minhps@hcmute.edu.vn; thiemqv@hcmute.edu.vn; *mangnv@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về quá trình biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ, một công đoạn quan trọng trong việc chuẩn bị bề mặt cho liên kết hàn ống rẽ nhánh. Nghiên cứu tập trung vào việc phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến hình dạng và chất lượng lỗ được tạo ra, bao gồm thông số hình học của dụng cụ khoan, lực tác dụng và đặc tính cơ học của mỗi loại vật liệu ống và chiều dày. Phương pháp thực nghiệm được sử dụng để thu thập dữ liệu và theo dõi quá trình biến dạng đối với từng thông số, từ đó có thể tối ưu hóa các thông số công nghệ nhằm đạt được lỗ móc có hình dạng và kích thước mong muốn, đồng thời giảm thiểu các khuyết tật tiềm ẩn.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và lựa chọn quy trình công nghệ tạo lỗ hiệu quả, góp phần nâng cao chất lượng và độ tin cậy của mối hàn ống rẽ nhánh, phục vụ thực tiễn sản xuất và tăng hiệu quả sản xuất.

Từ khóa: *Ống hình trụ; Móc lỗ ống; Hàn ống nối.*

ABSTRACT

The paper presents the results of a study on the hole-making deformation process on a cylindrical pipe body, an important step in surface preparation for branch pipe welding. The study focuses on analyzing the factors affecting the shape and quality of the created hole, including the geometric parameters of the drilling tool, the applied force, and the mechanical properties of each pipe material and thickness. Experimental methods are used to collect data and monitor the deformation process for each parameter, thereby optimizing the technological parameters to achieve the desired shape and size of the hook hole, while minimizing potential defects.

The research results provide a scientific basis for the design and selection of an effective hole-making technological process, contributing to improving the quality and reliability of branch pipe welding, serving production practices and increasing production efficiency.

Keywords: *Cylindrical tube; Tube hole hook; Tube joint welding.*

1. TỔNG QUAN

Quá trình gia công biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ là một trong những công đoạn quan trọng trong ngành cơ khí chế tạo, đặc biệt trong việc sản xuất các hệ thống ống dẫn phục vụ các lĩnh vực như dầu khí, năng lượng, và xây dựng. Liên kết hàn ống rẽ nhánh, nơi một ống nhánh được nối vào ống chính thông qua một lỗ được tạo sẵn, đòi hỏi độ chính xác cao và chất lượng bề mặt tốt để đảm bảo độ bền cơ học và khả năng chịu áp suất của mối hàn. Quá trình tạo lỗ không chỉ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của ống mà còn tác động trực tiếp đến hiệu quả của quá trình hàn sau đó. Trong bối cảnh công nghiệp hiện đại, việc tối ưu hóa quá trình biến dạng tạo lỗ nhằm nâng cao hiệu suất sản xuất, giảm thiểu khuyết tật và chi phí là một yêu cầu cấp thiết [1].

Biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ là một quá trình gia công kim loại sử dụng lực cơ học để làm biến dạng vật liệu tại vùng xác định, tạo ra một lỗ có kích thước và hình dạng mong muốn mà không làm mất đi tính liên tục của vật liệu. Quá trình này thường được thực hiện thông qua các phương pháp như dập, đột, hoặc kéo dãn, tùy thuộc vào yêu cầu kỹ thuật và đặc tính vật liệu [2].

Theo lý thuyết biến dạng dẻo, khi lực tác dụng vượt quá giới hạn chảy của vật liệu, ống sẽ trải qua biến dạng dẻo, dẫn đến sự thay đổi hình dạng vĩnh viễn. Trong trường hợp ống hình trụ, ứng suất và biến dạng phân bố không đồng đều do hình dạng cong của bề mặt, gây ra hiện tượng tập trung ứng suất tại vùng tiếp xúc giữa dụng cụ gia công và vật liệu [3]. Các nghiên cứu của Smith và cộng sự [4] đã chỉ ra rằng sự phân bố ứng suất này phụ thuộc vào các yếu tố như tỷ lệ đường kính lỗ so với đường kính ống, độ dày thành ống và loại vật liệu.

Một số mô hình lý thuyết, chẳng hạn như mô hình biến dạng dẻo dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM), đã được phát triển để mô phỏng quá trình tạo lỗ. Các mô hình này cho phép dự đoán sự phân bố ứng suất, biến dạng, và khả năng xuất hiện khuyết tật như nứt hoặc biến dạng không mong muốn [5]. Tuy nhiên, các mô hình lý thuyết thường cần được hiệu chỉnh thông qua thực nghiệm để đảm bảo tính chính xác trong các điều kiện thực tế.

Hiện nay, có nhiều phương pháp được sử dụng để tạo lỗ trên thân ống hình trụ, mỗi phương pháp có ưu và nhược điểm riêng, phụ thuộc vào mục đích sử dụng và đặc tính vật liệu. Dưới đây là một số phương pháp phổ biến:

• Dập lỗ (Punching): Phương pháp này sử dụng một chày dập để xuyên qua thành ống, tạo ra lỗ bằng cách loại bỏ vật liệu. Phương pháp dập lỗ có ưu điểm là tốc độ gia công nhanh và chi phí thấp, nhưng dễ gây ra các khuyết tật như rách vật liệu hoặc biến dạng vùng lân cận lỗ, đặc biệt khi gia công trên ống có thành mỏng [6].

• Đột lỗ (Piercing): Tương tự như dập lỗ, nhưng đột lỗ thường sử dụng một dụng cụ có hình dạng phức tạp hơn để tạo ra lỗ có độ chính xác cao hơn. Phương pháp này phù hợp với các ống có độ dày trung bình và yêu cầu chất lượng bề mặt tốt [7].

• Kéo dãn tạo lỗ (Extrusion): Trong phương pháp này, một lực kéo được áp dụng để làm biến dạng vật liệu xung quanh vùng tạo lỗ, tạo ra một cổ lỗ nhô lên (collar). Phương pháp kéo dãn đặc biệt hữu ích trong việc chuẩn bị bề mặt cho liên kết hàn ống rẽ nhánh, vì cổ lỗ giúp tăng diện tích tiếp xúc và cải thiện độ bền mối hàn [8].

• Gia công bằng laser hoặc plasma: Mặc dù không phải là phương pháp biến dạng, gia công cắt laser hoặc plasma đôi khi được sử dụng để tạo lỗ trên ống trước khi thực hiện các bước biến dạng bổ sung. Các phương pháp này mang lại độ chính xác cao nhưng chi phí vận hành lớn, không phù hợp với sản xuất hàng loạt [9].

Mỗi phương pháp đều có những hạn chế nhất định, chẳng hạn như sự phụ thuộc vào độ bền vật liệu, khả năng kiểm soát biến dạng, và chi phí thiết bị. Do đó, việc lựa chọn phương pháp phù hợp đòi hỏi phải cân nhắc kỹ lưỡng dựa trên yêu cầu kỹ thuật và điều kiện sản xuất. Chất lượng của lỗ được tạo ra trên thân ống hình trụ phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm:

• Đặc tính vật liệu: Độ bền, độ dẻo, và tính đồng nhất của vật liệu ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng biến dạng và nguy cơ xuất hiện khuyết tật. Ví dụ, các hợp kim thép không gỉ có độ bền cao thường khó gia công hơn thép carbon thông thường [10].

• Thông số hình học: Tỷ lệ giữa đường kính lỗ và đường kính ống, cũng như độ dày thành ống, đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát ứng suất và biến dạng. Các nghiên cứu chỉ ra rằng khi đường kính lỗ vượt quá 50% đường kính ống, nguy cơ nứt tăng đáng kể [4].

• Thông số gia công: Lực tác dụng, tốc độ gia công, và loại dụng cụ gia công đều ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt và độ chính xác của lỗ. Lực gia công quá lớn có thể gây ra biến dạng không mong muốn, trong khi lực quá nhỏ có thể dẫn đến lỗ không đạt kích thước yêu cầu [6].

• Điều kiện bôi trơn: Việc sử dụng chất bôi trơn phù hợp giúp giảm ma sát giữa dụng cụ và vật liệu, từ đó cải thiện chất lượng bề mặt và giảm nguy cơ rách vật liệu [7].

Các yếu tố này cần được tối ưu hóa đồng bộ để đảm bảo lỗ đạt yêu cầu về kích thước, hình dạng, và chất lượng bề mặt, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hàn ống rẽ nhánh.

Liên kết hàn ống rẽ nhánh là một kỹ thuật phổ biến trong các hệ thống ống dẫn, nơi chất lượng của lỗ trên ống chính quyết định độ bền và độ kín của mối hàn. Lỗ được tạo ra không chỉ cần có kích thước và hình dạng chính xác mà còn phải có bề mặt nhẵn, không có khuyết tật như rách, nứt, hoặc biến dạng quá mức. Các nghiên cứu của Johnson và cộng sự [8] đã chỉ ra rằng việc sử dụng phương pháp kéo dãn tạo lỗ có thể cải thiện đáng kể chất lượng mối hàn nhờ vào sự hình thành cổ lỗ, giúp tăng cường độ bám dính giữa ống chính và ống nhánh.

Ngoài ra, việc kiểm soát các thông số gia công trong quá trình tạo lỗ cũng ảnh hưởng đến tính chất cơ học của vùng xung quanh lỗ, từ đó tác động đến khả năng chịu áp suất và độ bền mỏi của mối hàn. Các khuyết tật như vết nứt vi mô hoặc biến dạng không đồng đều có thể trở thành điểm khởi đầu cho sự phá hủy trong quá trình vận hành [9].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc cải tiến quá trình tạo lỗ thông qua việc ứng dụng công nghệ số hóa và tự động hóa. Ví dụ, các hệ thống gia công sử dụng điều khiển số (CNC) kết hợp với mô phỏng FEM đã được sử dụng để tối ưu hóa thông số gia công và dự đoán khuyết tật trước khi thực hiện [5]. Ngoài ra, các vật liệu mới, chẳng hạn như hợp kim titan hoặc thép cường độ cao, đang đặt ra thách thức mới cho quá trình tạo lỗ, đòi hỏi sự phát triển của các dụng cụ và kỹ thuật gia công tiên tiến [10].

Một số hướng nghiên cứu tiềm năng trong tương lai bao gồm:

• Phát triển các phương pháp gia công

lai (hybrid) kết hợp biến dạng cơ học và gia công nhiệt để cải thiện chất lượng lỗ.

• Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong việc tối ưu hóa thông số gia công.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Đề tài "Nghiên cứu quá trình biến dạng tạo lỗ trên thân ống hình trụ phục vụ liên kết hàn ống rẽ nhánh" xuất phát từ nhu cầu cấp thiết trong các ngành công nghiệp như dầu khí, xây dựng và chế tạo cơ khí. Việc tạo lỗ chính xác trên ống ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng mối hàn và độ bền hệ thống.

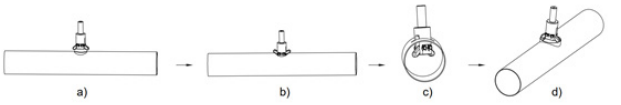
Tại Việt Nam, chưa có giải pháp công nghệ tối ưu cho quá trình này, trong khi nhu cầu ứng dụng hệ thống đường ống rất lớn. Đề tài hướng đến xây dựng phương pháp tối ưu nhằm nâng cao chất lượng mối hàn, giảm chi phí và tăng tính cạnh tranh sản phẩm.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp thực nghiệm: Thu thập dữ liệu, số liệu từ quá trình thực nghiệm để đưa ra những kết quả phù hợp với tiêu chí ban đầu đề ra (số liệu đầu ra).

Đánh giá kết quả: Sau mỗi lần tạo lỗ, mẫu ống được kiểm tra bằng mắt thường, thước cặp, và các thiết bị đo không phá hủy.

Các tiêu chí đánh giá bao gồm: hình dạng và kích thước lỗ tạo ra, mức độ biến dạng và rạn nứt tại mép lỗ, độ phù hợp của lỗ với yêu cầu liên kết hàn nhánh, các mẫu lỗi hoặc biến dạng quá mức sẽ được ghi nhận để đối chiếu



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý móc lỗ

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

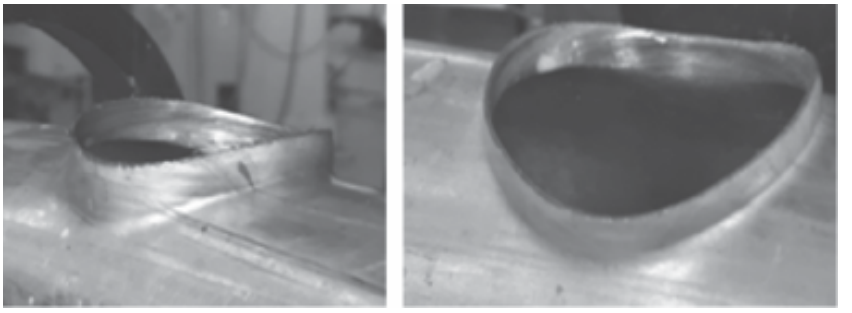
4.1. Các trường hợp thực nghiệm

Trường hợp 1: Thay đổi tốc độ.

Đối với vật liệu thép:

Bảng 1. Số liệu khi thay đổi tốc độ của vật liệu thép

Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều dày của ống (mm)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
55	1.2	34	7.6	51.2
90			7.8	51.3
110			7.82	51.35
Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều dày của ống (mm)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
55	1.4	34	8.18	51.45
90			8.55	51.5
110			8.73	51.7
Tốc độ quay (vòng/phút)	Chiều dày của ống (mm)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
55	1.6	34	8.33	51.6
90			8.55	51.65
110			8.73	51.73



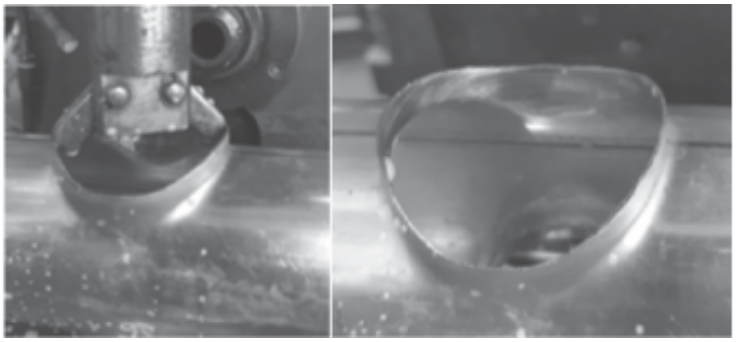
Hình 2. Kết quả khi thay đổi tốc độ với vật liệu thép.

Trường hợp 2: Thay đổi đường kính lỗ khoan.

Đối với vật liệu thép:

Bảng 2. Số liệu khi thay đổi đường kính lỗ khoan của vật liệu thép.

Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/ phút)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
34	1.2	55	7.6	51.35
36			7	51.43
38			6.2	51.5
Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/ phút)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
34	1.4	55	8.18	51.45
36			7.1	51.57
38			6.4	51.66
Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/ phút)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
34	1.6	55	8.33	51.6
36			7.33	51.75
38			6.6	51.83



Hình 3. Kết quả khi thay đổi đường kính lỗ khoan của vật liệu thép.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Trường hợp 3: Thay đổi chiều dày.

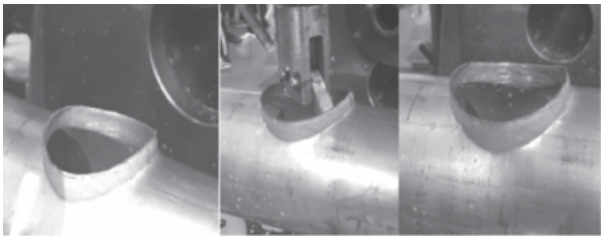
Đối với vật liệu thép:

Bảng 3. Số liệu khi thay đổi chiều dày của vật liệu thép.

Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
1.2	90	36	6.55	51.55
1.4			7.05	51.60
1.6			7.56	51.79

Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
1.2	90	38	6.2	51.70
1.4			6.85	51.78
1.6			6.73	51.85

Chiều dày của ống (mm)	Tốc độ quay (vòng/phút)	Đường kính lỗ khoan (mm)	Chiều cao móc lên (mm)	Đường kính của lỗ sau khi móc (mm)
1.2	110	38	6.3	51.85
1.4			6.55	51.90
1.6			6.85	51.88



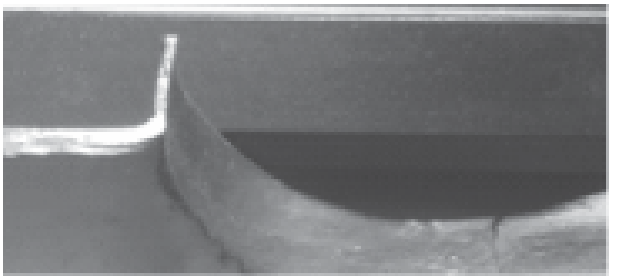
Hình 4. Kết quả khi thay đổi chiều dày của vật liệu thép.

***Cách tiến hành đo độ biến mỏng.**

Trong quá trình tạo thành vành lỗ thường xảy ra hiện tượng vật liệu bị hóa bền và chiều dày của phôi tại vùng biến dạng bị giảm được gọi là độ biến mỏng thành.

Những sản phẩm lỗ sau khi được móc lên thành công sẽ được cắt dọc bằng máy cưa cầm tay để thấy rõ độ biến mỏng của vật liệu.

Sau khi cắt, để thấy rõ độ biến mỏng của từng loại vật liệu, ta sử dụng thước kẹp để đo 5 điểm bất kỳ trên vành lỗ và ghi lại số liệu đã đo.



Hình 5. Độ biến mỏng từ ống thép

4.2. Phân tích kết quả thực nghiệm

Đối với trường hợp 1: Thay đổi tốc độ.

Vật liệu thép: Cùng chiều dày ống, cùng đường kính lỗ khoan ban đầu thì chiều cao móc lên và đường kính của lỗ sau khi móc tỉ lệ thuận với tốc độ quay.

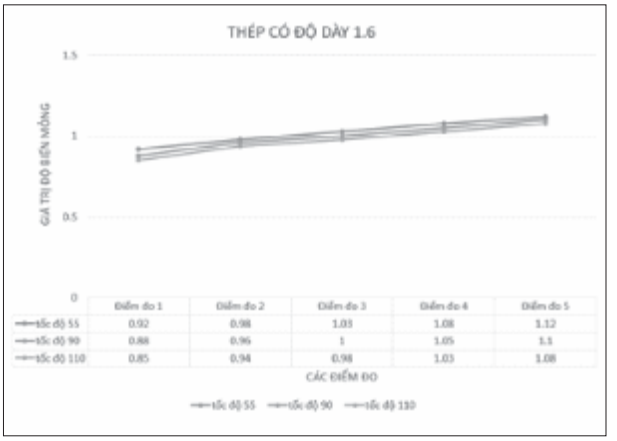
Đối với trường hợp 2: Thay đổi đường kính lỗ khoan ban đầu.

Cùng chiều dày ống, cùng tốc độ thì chiều cao móc lên tỉ lệ nghịch với đường kính lỗ khoan ban đầu còn đường kính lỗ sau khi móc tỉ lệ thuận với đường kính lỗ khoan ban đầu.

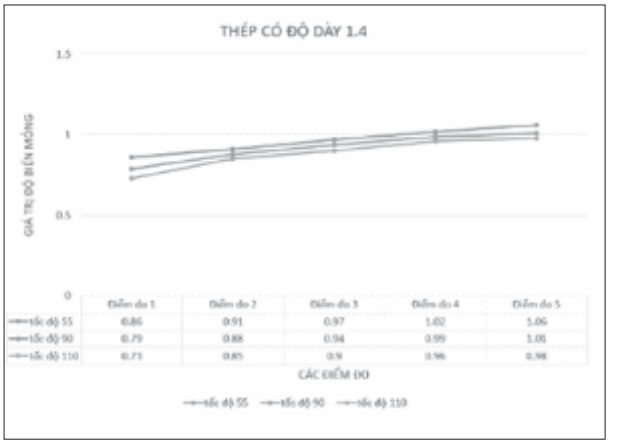
Đối với trường hợp 3: Thay đổi chiều dày của ống.

Cùng đường kính lỗ khoan ban đầu, cùng tốc độ thì chiều cao móc lên và đường kính lỗ sau khi móc tỉ lệ thuận với chiều dày của ống.

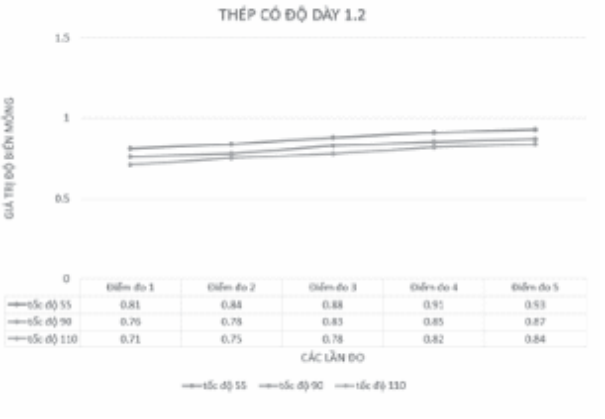
Phân tích kết quả độ biến mỏng của vật liệu:



Biểu đồ 6. Độ biến mỏng của vật liệu thép dày 1,6mm



Biểu đồ 7. Độ biến mỏng của vật liệu thép dày 1,4mm



Biểu đồ 8. Độ biến mỏng của vật liệu thép dày 1,2mm.

5. KẾT LUẬN

- Đối với cùng một vật liệu thì tốc độ tỉ lệ nghịch với độ biến mỏng. Tốc độ càng cao thì độ biến mỏng càng thấp.

- Giải quyết vấn đề gia công lỗ trên ống thép, ống đồng và ống inox.

- Cơ cấu đồ gá và dao dễ dàng tháo lắp, dễ dàng thay đổi cánh dao phù hợp với đường kính lỗ khoan, dễ dàng thay đổi các chi tiết nếu trong quá trình thực nghiệm có xảy ra hư hỏng.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

- Giảm chi phí gia công và nguyên liệu để sản xuất cơ cấu.

- Cơ cấu dao và đồ gá hoàn toàn cứng vững khi tiến hành thực nghiệm.

- Dễ dàng sử dụng và tiện lợi khi gắn trực tiếp trên máy phay vạn năng.

Những điểm hạn chế khi thực hiện thí nghiệm:

- Lỗ móc lên còn nhiều bavia quanh miệng lỗ nên phần phay sơ lại.

- Cánh dao nhanh mòn sau khi thực nghiệm nhiều lần.

- Quá trình thực nghiệm vẫn còn sai sót khi chưa chọn đúng tâm lỗ khoan và trục dao nên quá trình móc lỗ sẽ nghiêng về một bên. Cũng chưa xác định được khoảng cách lỗ khoan ban đầu.

- Còn hạn chế bởi vật liệu có độ cứng cao như inox.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh.

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Văn Quang, Phạm Sơn Minh, Quách Văn Thiêm, Nguyễn Văn Mang.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **22/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Zhuang, C., Xiong, Z., & Ding, H. (2022), "*Bézier extraction based isogeometric topology optimization with a locally-adaptive smoothed density model*". Journal of Computational Physics, 467, 111469. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111469

[2]. Bazilevs, Y., Calo, V., Cottrell, J., Evans, J., Hughes, T., Lipton, S., Scott, M., & Sederberg, T. (2010), "I*sogeometric analysis using T-splines*". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199, 229-263. https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.02.036

[3]. Liu, Z., Cheng, J., Yang, M., Yuan, P., Qiu, C., Gao, W., & Tan, J. (2019), "*Isogeometric analysis of large thin shell structures based on weak coupling of substructures with unstructured T-splines patches*". Advances in Engineering Software, 135, 102692. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.102692

[4]. Cottrell, J. A., Hughes, T. J. R., & Bazilevs, Y. (2009), "*Isogeometric analysis: Toward integration of CAD and FEA (1st ed.)*". Wiley.

[5]. Oesterle, B., Geiger, F., Forster, D., Fröhlich, M., & Bischoff, M. (2022), "*A study on the approximation power of NURBS and the significance of exact geometry in isogeometric pre-buckling analyses of shells*". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 397, 115144. https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115144

[6]. Evans, E., Scott, M., Li, X., & Thomas, D. (2015), "*Hierarchical T-splines: Analysis-suitability, Bézier extraction, and application as an adaptive basis for isogeometric analysis*". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 284, 1-20. https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.09.020

[7]. Koubaiti, O., Elkhalfi, A., & El-Mekkaoui, J. (2020), "*WEB-spline finite elements for the approximation of Navier-Lamé system with CA, B boundary condition*". Abstract and Applied Analysis, 2020, 1-14. https://doi.org/10.1155/2020/8892169

[8]. Koubaiti, O., El Fakkoussi, S., El-Mekkaoui, J., Moustachir, H., Elkhalfi, A., & Pruncu, C. I. (2021), "*The treatment of constraints due to standard boundary conditions in the context of the mixed Web-spline finite element method*". Engineering Computations, 38, 2937-2968. https://doi.org/10.1108/EC-05-2020-0314

[9]. Farahat, A., Verhelst, H. M., Kiendl, J., & Kapl, M. (2023), "*Isogeometric analysis for multi-patch structured Kirchhoff–Love shells*". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 411, 116060. https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116060

[10]. Hattori, G., Trevelyan, J., & Gourgiotis, P. (2023), "*An isogeometric boundary element formulation for stress concentration problems in couple stress elasticity*". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 407, 115932. https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115932

THỰC NGHIỆM CHẾ TẠO MẪU LIÊN KẾT HAI LỚP VẬT LIỆU BẰNG PHƯƠNG PHÁP ÉP Ở NHIỆT ĐỘ CAO

EXPERIMENTAL FABRICATION OF TWO-LAYER MATERIAL JOINT SAMPLES USING HIGH-TEMPERATURE COMPRESSION MOLDING

Trần Nhựt Quang, Hồ Xuân Thành, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 21143473@student.hcmute.edu.vn; thanhhx@hcmute.edu.vn; haspkt@hcmute.edu.vn; *tunglt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Quy trình thực nghiệm chế tạo mẫu vật liệu composite nhiều lớp bằng phương pháp ép nhiệt với mục tiêu tạo ra vật liệu có khối lượng nhẹ và độ bền cao, có tiềm năng ứng dụng trong các ngành công nghiệp hiện đại như hàng không và tàu thủy. Vật liệu nền sử dụng là hợp kim nhôm 5052 kết hợp với sợi carbon (CF), ép ở nhiều mức nhiệt độ khác nhau với thời gian và cấu trúc bố trí thay đổi. Kết quả thử nghiệm kéo cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của nhiệt độ và cấu trúc lớp đến độ bền cơ học. Một số mẫu cho thấy hiện tượng bong tách lớp hoặc giảm mạnh giới hạn bền, đặc biệt ở nhiệt độ ép cao. Bài báo đề xuất hướng cải tiến bằng cách bổ sung lớp kết dính bằng kẽm (Zn) để tăng khả năng liên kết, đồng thời giữ được cấu trúc nguyên khối của nhôm và đặc tính bền của sợi CF.

Từ khóa: *Composite kim loại; Ép nhiệt; Nhôm 5052; Sợi carbon; Liên kết đa lớp; Kẽm; Thử kéo.*

ABSTRACT

This study presents an experimental process for fabricating multilayer composite materials by hot pressing, with the aim of producing a lightweight and high-strength material suitable for industrial applications such as aerospace and shipbuilding. The base material used is 5052 aluminum alloy combined with carbon fibers (CF), with varying fiber orientations, stacking structures, and hot-pressing parameters. Eight different sample configurations were fabricated and tested. Mechanical tensile testing results show that temperature and layer configuration significantly affect the material's mechanical strength. In several cases, the bonding between layers was weak or even failed, especially at higher pressing temperatures. Based on the findings, the study proposes a potential improvement by using zinc (Zn) as an interlayer bonding agent. Zinc's low melting point may allow effective bonding at lower temperatures while preserving the mechanical integrity of the base aluminum and the carbon fibers. This approach is expected to enhance interfacial bonding in multilayer composites and will be explored in future studies.

Keywords: *Hot pressing; Aluminum 5052; Carbon fiber; Multilayer composite; Interfacial bonding; Mechanical strength; Zinc bonding layer.*

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh phát triển công nghiệp hiện đại, nhu cầu về các vật liệu composite và liên kết đa lớp ngày càng gia tăng, đặc biệt trong các lĩnh vực như hàng không vũ trụ, ô tô, và năng lượng [1]. Liên kết hai lớp vật liệu với các tính chất cơ lý khác nhau nhằm tạo ra sản phẩm có khả năng chịu tải tốt hơn, chống ăn mòn, và tối ưu hóa hiệu suất sử dụng là một hướng nghiên cứu quan trọng [2]. Phương pháp ép ở nhiệt độ cao (hot pressing) đã được chứng minh là một kỹ thuật hiệu quả để tạo ra các liên kết chắc chắn giữa các lớp vật liệu, nhờ khả năng kiểm soát nhiệt độ, áp suất, và môi trường xử lý [3]. Phần tổng quan này nhằm cung cấp cái nhìn toàn diện về cơ sở lý thuyết, các yếu tố ảnh hưởng, và tiến bộ gần đây trong việc chế tạo mẫu liên kết hai lớp vật liệu bằng phương pháp ép ở nhiệt độ cao, đồng thời xác định các thách thức và định hướng nghiên cứu trong tương lai.

Phương pháp ép ở nhiệt độ cao là một quá trình kết hợp áp suất cơ học và nhiệt độ cao để thúc đẩy sự liên kết giữa các bề mặt vật liệu [4]. Quá trình này thường được thực hiện trong môi trường chân không hoặc khí trơ để ngăn chặn quá trình oxy hóa ở nhiệt độ cao. Cơ chế liên kết chủ yếu dựa trên sự khuếch tán nguyên tử qua giao diện giữa hai lớp vật liệu, hình thành các vùng liên kết liên kim hoặc liên kết liên kết hóa học [5]. Theo nghiên cứu của Smith và cộng sự, sự khuếch tán nguyên tử được kích hoạt bởi năng lượng nhiệt, trong khi áp suất đảm bảo sự tiếp xúc chặt chẽ giữa các bề mặt, giảm thiểu các khuyết tật như lỗ rỗng hay nứt gãy [6].

Các yếu tố chính ảnh hưởng đến chất lượng liên kết bao gồm:

• Nhiệt độ: Nhiệt độ phải đủ cao để kích hoạt quá trình khuếch tán nhưng không vượt quá điểm nóng chảy của vật liệu, nhằm tránh biến dạng hoặc phá hủy cấu trúc [7].

• Áp suất: Áp suất cần được tối ưu để đảm bảo tiếp xúc bề mặt mà không gây biến dạng cơ học quá mức [8].

• Thời gian xử lý: Thời gian giữ nhiệt và áp suất ảnh hưởng trực tiếp đến mức độ khuếch tán và chất lượng liên kết [9].

• Tính chất bề mặt: Độ nhám, độ sạch của bề mặt, và sự tương thích hóa học giữa hai vật liệu đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành liên kết [10].

Các nghiên cứu gần đây tập trung vào nhiều cặp vật liệu khác nhau, bao gồm kim loại-kim loại, kim loại-gốm, và kim loại-polymer. Ví dụ, liên kết giữa thép không gỉ và hợp kim nhôm được ứng dụng rộng rãi trong ngành ô tô nhờ khả năng kết hợp độ bền cao của thép với trọng lượng nhẹ của nhôm [1]. Trong lĩnh vực hàng không vũ trụ, liên kết giữa titan và gốm chịu nhiệt được nghiên cứu để chế tạo các bộ phận chịu nhiệt độ cao [2]. Ngoài ra, các liên kết kim loại-polymer, như nhôm và polyetylen, đang thu hút sự chú ý trong các ứng dụng nhẹ, chẳng hạn như vỏ máy bay hoặc thiết bị y tế [3].

Mỗi cặp vật liệu đặt ra các thách thức riêng, đặc biệt liên quan đến sự khác biệt về hệ số giãn nở nhiệt, tính dẫn nhiệt, và tính chất hóa học. Ví dụ, khi liên kết kim loại với gốm, sự chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt có thể dẫn đến ứng suất dư, gây nứt gãy giao diện [4]. Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã đề xuất sử dụng lớp đệm trung gian (interlayer), chẳng hạn như hợp kim niken, để cải thiện tính tương thích và giảm ứng suất [5]. ☞

Những tiến bộ gần đây trong công nghệ ép ở nhiệt độ cao bao gồm việc sử dụng các hệ thống điều khiển nhiệt độ và áp suất chính xác hơn, cũng như tích hợp các kỹ thuật phân tích thời gian thực để giám sát quá trình liên kết [6]. Các máy ép hiện đại được trang bị cảm biến và phần mềm phân tích, cho phép tối ưu hóa các thông số xử lý theo thời gian thực, từ đó cải thiện độ đồng nhất và chất lượng của liên kết [7].

Ngoài ra, các phương pháp xử lý bề mặt trước khi ép, như làm sạch bằng plasma hoặc phủ lớp màng mỏng, đã được chứng minh là cải thiện đáng kể độ bám dính giữa các lớp vật liệu [8]. Nghiên cứu của Lee và cộng sự cho thấy rằng việc sử dụng plasma để làm sạch bề mặt thép không gỉ trước khi liên kết với hợp kim nhôm có thể tăng độ bền liên kết lên đến 30% [9]. Các lớp phủ trung gian, chẳng hạn như oxit kim loại hoặc hợp chất intermetallic, cũng được sử dụng để tăng cường sự khuếch tán và giảm khuyết tật giao diện [10].

Phương pháp ép ở nhiệt độ cao đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp. Trong ngành hàng không vũ trụ, các liên kết titan-gốm được sử dụng để chế tạo các bộ phận động cơ phản lực, nơi yêu cầu khả năng chịu nhiệt và độ bền cơ học cao [1]. Trong ngành ô tô, liên kết thép-nhôm được ứng dụng để chế tạo thân xe nhẹ, giúp giảm tiêu thụ nhiên liệu và khí thải [2]. Ngoài ra, trong lĩnh vực năng lượng, các liên kết kim loại-gốm được sử dụng trong sản xuất pin nhiên liệu và các thiết bị chuyển đổi năng lượng nhờ khả năng chịu nhiệt độ và môi trường khắc nghiệt [3].

Mặc dù phương pháp ép ở nhiệt độ cao mang lại nhiều lợi ích, vẫn còn một số thách thức cần giải quyết. Thứ nhất, chi phí vận hành cao do yêu cầu thiết bị chuyên dụng và môi trường xử lý đặc biệt (chân không hoặc khí trơ) khiến kỹ thuật này khó áp dụng đại trà [4]. Thứ hai, việc tối ưu hóa các thông số xử lý cho từng cặp vật liệu cụ thể đòi hỏi nhiều thử nghiệm, làm tăng thời gian và chi phí nghiên cứu [5]. Thứ ba, các khuyết tật giao diện, như lỗ rỗng hoặc ứng suất dư, vẫn là vấn đề phổ biến, đặc biệt khi liên kết các vật liệu có tính chất khác biệt lớn [6].

Để khắc phục những thách thức này, các hướng nghiên cứu trong tương lai bao gồm:

• Phát triển mô hình mô phỏng: Sử dụng các mô hình tính toán để dự đoán hành vi khuếch tán và ứng suất trong quá trình liên kết, từ đó giảm số lượng thử nghiệm thực tế [7].

• Ứng dụng trí tuệ nhân tạo: Tích hợp AI để tối ưu hóa thông số xử lý và dự đoán chất lượng liên kết dựa trên dữ liệu thời gian thực [8].

• Vật liệu mới: Nghiên cứu các lớp đệm hoặc vật liệu composite mới để cải thiện tính tương thích giữa các lớp vật liệu [9].

• Giảm chi phí: Phát triển các hệ thống ép ở nhiệt độ cao hiệu quả hơn, sử dụng năng lượng thấp và không yêu cầu môi trường xử lý phức tạp [10].

Phương pháp ép ở nhiệt độ cao là một kỹ thuật tiên tiến để chế tạo các liên kết hai lớp vật liệu, mang lại tiềm năng lớn trong việc cải thiện hiệu suất và độ bền của các sản phẩm công nghiệp. Những tiến bộ trong công nghệ và quy trình xử lý đã giúp nâng cao chất lượng liên kết, nhưng vẫn còn nhiều thách thức cần vượt qua để mở rộng ứng dụng của phương pháp này. Với sự phát triển của các công cụ mô phỏng, trí tuệ nhân tạo, và vật liệu mới, phương

pháp ép ở nhiệt độ cao hứa hẹn sẽ tiếp tục đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp tiên tiến.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Khi xử lý vật liệu ở nhiệt độ cao, liên kết giữa các lớp có thể thay đổi theo thời gian, độ ẩm, hoặc chất liệu lớp trung gian. Đối với composite gỗ – nhựa, nghiên cứu của Văn Thiêm và Văn Chứ (2013) đã chỉ ra rằng chế độ ép quyết định trực tiếp tới độ bền kéo và uốn của vật liệu [3]. Tương tự, trong các vật liệu kim loại, đặc biệt là nhôm – sợi CF, chế độ nhiệt và áp lực cũng có thể gây ra hiện tượng mất liên kết, giòn hóa hoặc phá vỡ pha gia cường, nếu vượt quá giới hạn chịu nhiệt từng thành phần.

Ở một hướng khác, trong lĩnh vực pin nhiên liệu, việc kiểm soát nhiệt độ được xem là yếu tố sống còn để đảm bảo độ bền của màng polymer điện ly [4]. Sự tương đồng này cho thấy vai trò tối quan trọng của việc tối ưu hóa điều kiện nhiệt trong mọi loại vật liệu nhiều lớp.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. Chuẩn bị cho thí nghiệm

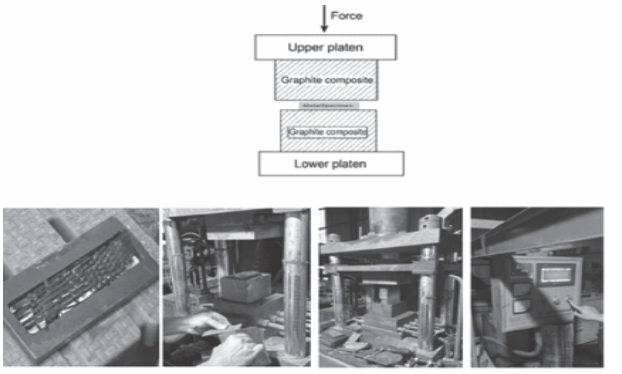
Thí nghiệm được thực hiện trên máy ép nhiệt SJJ-HXP0 của Zhengzhou Institute of Mechanical Engineering, có khả năng điều chỉnh nhiệt độ và lực ép. Các tham số cụ thể của máy như sau:

• Lực ép: 25 kN.

• Nhiệt độ ép: Từ 640°C đến 670°C.

• Thời gian ép: Từ 800s đến 850s.

3.2. Chế tạo mẫu vật liệu composite



Hình 1. Các bước chế tạo mẫu liên kết hai lớp vật liệu bằng phương pháp ép ở nhiệt độ cao

Các mẫu vật liệu composite được chế tạo từ nhôm 5052 và sợi carbon (CF) theo các cấu trúc khác nhau. Mỗi cấu trúc có sự khác biệt về số lượng tấm nhôm, cách xếp sợi carbon và các điều kiện ép nhiệt.
Bố trí mẫu CF:

• Trong các mẫu có sợi CF, cách bố trí thay đổi để nghiên cứu ảnh hưởng của hướng sợi (dọc, ngang, caro) và phân lớp CF xen kẽ đến chất lượng liên kết.

• Mẫu số 3 sử dụng dạng lưới caro – sợi dọc kết hợp sợi ngang, giúp tăng liên kết hai chiều.

• Mẫu 6 và 8 sử dụng nhiều lớp CF đan xen giữa các lớp nhôm – đại diện cho cấu trúc dạng laminate.

3.3. Kiểm tra độ bền kéo

Sau khi chế tạo các mẫu, chúng được thử nghiệm độ bền kéo để xác định các thông số như lực kéo chảy, giới hạn chảy, lực kéo đứt và giới hạn đứt.

Dưới đây là các mẫu và thông số chế tạo: ☞

Bảng 1. Thông số chế tạo các mẫu

Mẫu	Cấu trúc	Nhiệt độ (°C)	Thời gian ép (s)	Lực ép (kN)
1	2 tấm nhôm nguyên khối không ép nhiệt	-	-	-
2	1 tấm nhôm nguyên khối không ép nhiệt	-	-	-
3	2 tấm nhôm ép nhiệt với các sợi carbon xếp caro (5 sợi dọc và 12 sợi ngang)	650	800	25
4	2 tấm nhôm ép nhiệt với 5 sợi carbon xếp dài	650	850	25
5	5 tấm nhôm ép nhiệt	640	800	25
6	5 tấm nhôm ép với 4 lớp sợi carbon đan xen	640	800	25
7	2 tấm nhôm dày + 2 tấm nhôm mỏng với cuộn tấm carbon bên trong	640	800	25
8	5 tấm nhôm ép với 4 lớp sợi carbon đan xen	670	800	25

4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH (RESULTS AND DISCUSSION)

4.1. Kết quả kiểm tra độ bền kéo

Dưới đây là kết quả kiểm tra độ bền kéo của các mẫu vật liệu:

Bảng 2. Kết quả độ bền kéo của các mẫu

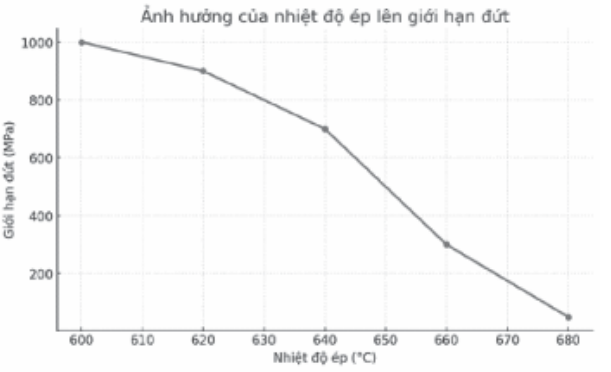
Mẫu	Tiết diện (mm^2)	Lực kéo chảy (kN)	Giới hạn chảy (MPa)	Lực kéo đứt (kN)	Giới hạn đứt (MPa)
Mẫu 1	24	29.4	1255	35.10	1464
Mẫu 2	24	10.91	454.50	23.8	922.8
Mẫu 3	24	0	0	12.6	526.6
Mẫu 4	24	4.82	200.7	6.7	279.7
Mẫu 5	20	6.86	342.8	10.6	528.9
Mẫu 6	20	0.32	15.9	0.3	17.1
Mẫu 7	20	0	0	6.3	313.3
Mẫu 8	20	0	0	0	1.8

Trong nghiên cứu này, các mẫu vật liệu composite đã được tiến hành thử nghiệm để xác định các thông số cơ tính cơ bản, đặc biệt là giới hạn chảy và giới hạn đứt. Kết quả thử nghiệm được tổng hợp trong bảng dữ liệu, cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các mẫu. Mẫu 1 đạt giới hạn đứt cao nhất lên đến 1464 MPa, phản ánh tính chất cơ học vượt trội và đồng nhất của vật liệu nhôm nguyên khối. Mẫu 2 mặc dù có giá trị thấp hơn so với mẫu 1 nhưng vẫn duy trì khả năng chịu lực đáng kể. Điều này có thể là do sự hiện diện của một số lớp sợi CF nhưng chưa đạt được liên kết tối ưu. Trong khi đó, các mẫu 3, 4 và 5 có giá trị độ bền thấp hơn đáng kể, cho thấy việc ép CF vào giữa các lớp nhôm chưa đảm bảo hiệu quả kết dính cần thiết. Đặc biệt, mẫu 6 và 8 có giá trị cực thấp hoặc không ghi nhận được, chỉ ra rằng các liên kết đã hoàn toàn bị phá hủy do nhiệt độ ép cao và số lớp CF quá nhiều, dẫn đến hiện tượng phân lớp và đứt gãy sớm. Kết quả này khẳng định rõ ràng rằng tính chất cơ học của composite phụ thuộc rất lớn vào khả năng liên kết giữa các lớp vật liệu và tính đồng nhất của cấu trúc.

Một phân tích sâu hơn cho thấy giới hạn chảy và giới hạn đứt có mối tương quan trực tiếp với cấu trúc composite. Giới hạn đứt luôn cao hơn giới hạn chảy, nhưng độ chênh lệch này phản ánh rõ rệt mức độ dẻo của vật liệu. Đồ thị 1 dưới đây minh họa sự khác biệt giữa các mẫu, trong đó mẫu 1 có khoảng cách lớn nhất giữa hai giới hạn, chứng minh tính dẻo tốt và khả năng chịu tải cao.



Hình 2. Giới hạn chảy của các mẫu



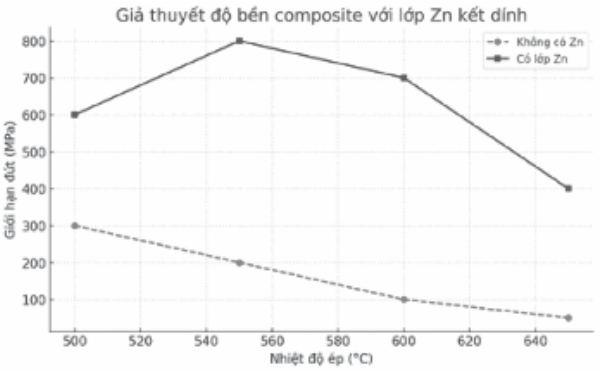
Hình 3. Giới hạn bền của các mẫu

Kết quả kiểm tra cơ tính cho thấy sự suy giảm đáng kể ở các mẫu composite có chứa sợi CF, nguyên nhân chủ yếu đến từ các yếu tố công nghệ trong quá trình ép nhiệt. Yếu tố đầu tiên là nhiệt độ ép. Khi nhiệt độ ép vượt quá 640°C, nhôm bắt đầu mất tính dẻo và trở nên mềm hóa, không còn khả năng bám dính tốt vào các lớp CF. Mặc dù sợi CF có khả năng chịu nhiệt rất tốt, nhưng bản thân nó không thể tạo ra liên kết luyện kim trực tiếp với nhôm ở nhiệt độ cao nếu không có lớp kết dính trung gian. Ngoài ra, nhiệt độ ép quá cao còn tạo điều kiện phát triển các vết nứt hoặc biến dạng không mong muốn, gây phá hủy cấu trúc composite.

Yếu tố thứ hai là thời gian ép. Thời gian ép dài có thể giúp CF "bám" tốt hơn ở mức độ nào đó, nhưng ở nhiệt độ quá cao, hiện tượng khuếch tán xảy ra, phá hủy cấu trúc vi mô của lớp nhôm, dẫn đến sự phân lớp hoặc rỗng do chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt. Đồ thị 2 dưới đây thể hiện rõ sự suy giảm nhanh chóng của giới hạn đứt khi nhiệt độ ép tăng lên. Từ 600°C trở lên, giới hạn đứt giảm đáng kể và đặc biệt giảm mạnh trên 640°C, khẳng định nhôm bắt đầu mất tính dẻo và dễ bị nứt gãy.

Bên cạnh đó, cấu trúc lớp composite cũng đóng vai trò quan trọng. Các mẫu có quá nhiều lớp CF (như mẫu 6 và 8) cho thấy độ ☞

bền suy giảm mạnh vì không còn đủ "lực dính" giữa các lớp. Trong khi đó, mẫu nhôm nguyên khối (mẫu 1) và mẫu 2 (ít lớp CF, có lớp kết dính tạm ổn) vẫn giữ được khả năng chịu lực tương đối tốt.



Hình 4. So sánh ảnh hưởng của độ bền với các loại vật liệu khác nhau

Nhằm khắc phục nhược điểm về sự kết dính giữa các lớp composite, nhóm nghiên cứu đã đề xuất một hướng tiếp cận mới: sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian. Kẽm có nhiệt độ nóng chảy thấp (khoảng 419°C), nên khi ép ở nhiệt độ dưới 600°C, lớp kẽm sẽ chảy ra và len lỏi vào các khe hở giữa nhôm và CF, tạo ra liên kết luyện kim bền chắc. Điều này không chỉ giúp tránh được tình trạng phá hủy cấu trúc composite do nhiệt độ cao mà còn cải thiện đáng kể độ bền kéo.

Bên cạnh đó, kẽm có khả năng tạo liên kết luyện kim với nhôm, hình thành hợp kim eutectic Zn-Al, từ đó cải thiện độ bền liên kết của composite. Lớp Zn còn giúp giảm ứng suất tập trung tại các biên lớp, hạn chế sự khởi phát của vết nứt. Đặc biệt, Zn như một "chất keo" luyện kim, giúp gắn kết các lớp nhôm và CF tốt hơn, giảm hiện tượng phân lớp và tách lớp khi chịu tải kéo. Đồ thị 3 dưới đây minh họa giả thiết rằng khi có lớp Zn, độ bền kéo của composite sẽ tăng đáng kể, với nhiệt độ ép tối ưu khoảng 550-600°C.

5. KẾT LUẬN

Thực nghiệm chế tạo vật liệu composite nhôm – sợi carbon bằng phương pháp ép nhiệt cho thấy:

• Nhiệt độ và cấu trúc lớp ảnh hưởng lớn đến cơ tính của vật liệu.

• Liên kết giữa nhôm và CF hiện tại chưa đủ bền, một phần do thiếu lớp trung gian.

• Việc tối ưu nhiệt độ và thêm vật liệu kết dính như kẽm là hướng khả thi để nâng cao chất lượng vật liệu.

Nghiên cứu mở ra tiềm năng phát triển vật liệu composite mới có ứng dụng trong công nghiệp nhẹ, hàng không và tàu thủy.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Trọng Hiếu;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Trần Nhựt Quang, Hồ Xuân Thành, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-366.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **22/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Deveci, S., Antony, N., & Eryigit, B. (2018), "*Effect of carbon black distribution on the properties of polyethylene pipes - Part 1: Degradation of post yield mechanical properties and fracture surface analyses*". Polymer Degradation and Stability, 148, 75-85. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.01.005

[2]. Huang, H. (2000), "*Structure development and property changes in high density polyethylene during pan-milling*". Journal of Applied Polymer Science, 78(11), 2016-2024. https://doi.org/10.1002/1097-4628(20001209)78:11<2016::AID-APP230>3.0.CO;2-6

[3]. Vijendra, B., & Sharma, A. (2015), "*Induction heated tool assisted friction-stir welding (I-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics*". Journal of Manufacturing Processes, 20, 234-244. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.07.005

[4]. Banjare, P., Sahlot, P., & Arora, A. (2017), "*An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics*". Journal of Materials Processing Technology, 239, 83-91. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.015

[5]. Nath, R., Maji, P., & Barma, J. D. (2019), "*Development of a self-heated friction stir welding tool for welding of polypropylene sheets*". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41(12), Article 553. https://doi.org/10.1007/s40430-019-2059-2

[6]. Almond, J., Sugumaar, P., Wenzel, M. N., Hill, G., & Wallis, C. (2020), "*Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy*". e-Polymers, 20(1), 369-381. https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0041

[7]. Zhang, J., Shen, Y., Li, B., Xu, H., Yao, X., Kuang, B., & et al. (2014), "*Numerical simulation and experimental investigation on friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy*". Materials & Design, 60, 94-101. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.023

[8]. Sujuan, Y., & Xingrong, Z. (2014), "*Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures*". Tribology Transactions, 57(3), 382-386. https://doi.org/10.1080/10402004.2013.873803

[9]. Eslami, S., Miranda, J., Mourão, L., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P. (2018), "*Polyethylene friction stir welding parameter optimization and temperature characterization*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99(1-4), 127-136. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2478-8

[10]. Deveci, S., Kaliappan, S. K., Fawaz, J., Gadgoli, U., & Das, B. (2018), "*Sensitivity of post yield axial deformation properties of high-density ethylene/α-olefin copolymers in relation to molecular structure and slow crack growth resistance*". Polymer Testing, 72, 285-297. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.027

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÔ HÌNH GIẢI NHIỆT DẠNG LỚP CHO LÒNG KHUÔN VỚI SẢN PHẨM DẠNG LÕM

STUDY ON THE FABRICATION OF A LAYERED COOLING MODEL FOR MOLD CAVITIES WITH CONCAVE-SHAPED PRODUCTS

Vy Lăng Thiên Phước, Nguyễn Tiến Dũng, Trần Thanh Thưởng, Nguyễn Trà Kim Quyên*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21143380@student.hcmute.edu.vn;
dungnt@hcmute.edu.vn;
thuongtt@hcmute.edu.vn;
**quyenntk@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Trong ngành công nghiệp chế tạo khuôn mẫu, đặc biệt là khuôn ép nhựa, hệ thống làm mát đóng vai trò vô cùng quan trọng trong việc giảm thời gian chu kỳ ép, cải thiện chất lượng sản phẩm và kéo dài tuổi thọ khuôn. Đối với các sản phẩm có hình dạng phức tạp, đặc biệt là dạng lõm (như cốc, vỏ linh kiện điện tử, nắp hộp…), việc thiết kế và chế tạo hệ thống giải nhiệt tối ưu càng trở nên thách thức. Nó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất. Duy trì một nhiệt độ ổn định và phân bố đều trên bề mặt khuôn là yếu tố then chốt để sản xuất các sản phẩm nhựa chất lượng cao. Nghiên cứu này tập trung vào việc áp dụng các kỹ thuật điều khiển nhiệt độ tiên tiến để đạt được điều kiện nhiệt tối ưu trong khoang khuôn. Bằng cách phân tích các phương pháp điều khiển khác nhau và tác động của chúng lên phân bố nhiệt độ, nghiên cứu nhằm nâng cao độ đồng nhất của sản phẩm và giảm thiểu khuyết tật, từ đó cải thiện hiệu suất sản xuất tổng thể. Giải pháp làm mát dạng lớp (conformal cooling) cho phép kênh làm mát bám sát bề mặt lòng khuôn, từ đó tăng hiệu quả truyền nhiệt so với các kênh làm mát khoan thẳng truyền thống. Việc nghiên cứu và chế tạo mô hình giải nhiệt dạng lớp với sản phẩm dạng lõm giúp tối ưu hóa hệ thống giải nhiệt cho khuôn phức tạp.

Từ khóa: *Ép phun; Khuôn lõm; Giải nhiệt dạng lớp; Mô hình khuôn; Phân bố nhiệt độ.*

ABSTRACT

In the mold manufacturing industry, especially in plastic injection molding, the cooling system plays a crucial role in reducing cycle time, improving product quality, and extending mold life. For products with complex geometries, particularly concave shapes (such as cups, electronic housings, and container lids), the design and fabrication of an optimal cooling system become increasingly challenging. It directly affects product quality and production efficiency. Maintaining a stable and uniform temperature distribution across the mold surface is essential for producing high-quality plastic parts. This study focuses on the application of advanced temperature control techniques to achieve optimal thermal conditions within the mold cavity. By analyzing different

control methods and their effects on temperature distribution, the research aims to enhance product uniformity, minimize defects, and improve overall production efficiency. Conformal cooling offers a solution by allowing cooling channels to follow the contour of the mold cavity, thereby increasing heat transfer efficiency compared to traditional straight-drilled channels. The design and fabrication of a conformal cooling model for concave-shaped molds help optimize the thermal management of complex molds.

Keywords: *Injection molding; Concave mold; Conformal cooling; Mold modeling; Temperature distribution.*

1. TỔNG QUAN

Hệ thống giải nhiệt trong khuôn đúc có nhiệm vụ kiểm soát nhiệt độ của lòng khuôn trong suốt quá trình đúc, từ giai đoạn làm đầy khuôn đến khi sản phẩm nguội và được lấy ra [4]. Nhiệt độ khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt, độ chính xác kích thước, và tính chất cơ học của sản phẩm. Trong trường hợp sản phẩm dạng lõm, các vùng sâu hoặc có góc cạnh phức tạp thường khó làm mát đồng đều, dẫn đến hiện tượng co ngót không đều, ứng suất dư, hoặc biến dạng sản phẩm [5]. Các phương pháp giải nhiệt truyền thống sử dụng kênh làm mát dạng ống dẫn chất lỏng (thường là nước hoặc dầu) qua khuôn, nhưng thiết kế này không tối ưu cho các khuôn có hình dạng phức tạp, đặc biệt là khuôn lõm [6].

Mô hình giải nhiệt dạng lớp là một cách tiếp cận mới, trong đó các kênh làm mát được thiết kế thành nhiều lớp phân bố theo cấu trúc ba chiều, cho phép chất làm mát tiếp cận gần hơn với bề mặt lòng khuôn [7]. Phương pháp này tận dụng các kỹ thuật chế tạo tiên tiến như in 3D kim loại (additive manufacturing) để tạo ra các cấu trúc kênh làm mát phức tạp, phù hợp với hình dạng của sản phẩm [8]. Nguyên lý hoạt động của hệ thống giải nhiệt dạng lớp dựa trên việc tối ưu hóa dòng chảy chất làm mát, tăng cường trao đổi nhiệt, và giảm gradient nhiệt độ trong khuôn. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng hệ thống này có thể giảm thời gian làm mát từ 20% đến 40% so với các hệ thống truyền thống, đồng thời cải thiện chất lượng sản phẩm [9].

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để cải tiến hệ thống giải nhiệt trong khuôn đúc, đặc biệt là với sự phát triển của các công nghệ chế tạo tiên tiến. Theo Wang và cộng sự [2], việc sử dụng các kênh làm mát dạng lưới (conformal cooling channels) có thể cải thiện hiệu suất làm mát lên đến 30% so với kênh thẳng truyền thống. Tuy nhiên, các kênh dạng lưới vẫn gặp khó khăn khi áp dụng cho các sản phẩm có dạng lõm sâu do hạn chế về không gian và độ phức tạp của thiết kế. Để giải quyết vấn đề này, Li và cộng sự [7] đã đề xuất mô hình giải nhiệt dạng lớp, trong đó các kênh làm mát được phân bố thành nhiều lớp mỏng, mỗi lớp được tối ưu hóa để phù hợp với hình dạng của lòng khuôn. Nghiên cứu này sử dụng mô phỏng dòng chảy và truyền nhiệt để chứng minh rằng hệ thống dạng lớp có thể giảm thời gian chu kỳ sản xuất và cải thiện độ đồng đều nhiệt độ.

Công nghệ in 3D kim loại đã mở ra cơ hội lớn cho việc chế tạo các hệ thống giải nhiệt phức tạp. Theo nghiên cứu của Zhang và cộng sự [8], việc sử dụng in 3D để tạo kênh làm mát dạng lớp cho phép tăng cường khả năng trao đổi nhiệt nhờ vào thiết kế kênh có diện tích bề mặt lớn hơn và khả năng tiếp cận các vùng khó làm mát. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng chỉ ra ☞

rằng chi phí sản xuất cao và yêu cầu kỹ thuật phức tạp là những rào cản chính trong việc áp dụng công nghệ này vào thực tiễn [10]. Ngoài ra, các nghiên cứu của Kim và cộng sự [11] đã tập trung vào việc tối ưu hóa thông số dòng chảy chất làm mát, chẳng hạn như tốc độ dòng chảy và áp suất, để đạt được hiệu suất làm mát tối ưu trong các hệ thống dạng lớp.

Mặc dù có nhiều tiến bộ, các nghiên cứu hiện tại vẫn chưa giải quyết triệt để các thách thức liên quan đến sản phẩm dạng lõm. Ví dụ, theo báo cáo của Chen và cộng sự [12], các sản phẩm có dạng lõm sâu thường gặp vấn đề về ứng suất nhiệt do sự khác biệt lớn về nhiệt độ giữa các vùng của khuôn. Hệ thống giải nhiệt dạng lớp có tiềm năng khắc phục vấn đề này, nhưng cần thêm các nghiên cứu thực nghiệm để xác nhận tính khả thi trong môi trường sản xuất thực tế. Hơn nữa, việc tích hợp hệ thống giải nhiệt dạng lớp với các công nghệ tự động hóa và trí tuệ nhân tạo để tối ưu hóa quá trình làm mát cũng là một hướng nghiên cứu mới, như đã được đề cập trong nghiên cứu của Park và cộng sự [13].

Việc phát triển và ứng dụng mô hình giải nhiệt dạng lớp cho lòng khuôn sản xuất sản phẩm dạng lõm đối mặt với nhiều thách thức. Thứ nhất, thiết kế các kênh làm mát dạng lớp đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về hình dạng sản phẩm, tính chất vật liệu, và dòng chảy chất làm mát. Các phần mềm mô phỏng như ANSYS hoặc COMSOL thường được sử dụng để tối ưu hóa thiết kế, nhưng việc xác nhận kết quả mô phỏng trong điều kiện thực tế vẫn là một vấn đề lớn [14]. Thứ hai, chi phí chế tạo khuôn với hệ thống giải nhiệt dạng lớp, đặc biệt khi sử dụng in 3D kim loại, vẫn còn cao, khiến giải pháp này khó áp dụng cho các doanh nghiệp vừa và nhỏ [10]. Thứ ba, việc duy trì độ bền và độ ổn định của các kênh làm mát dạng lớp trong điều kiện vận hành khắc nghiệt (nhiệt độ cao, áp suất lớn) cũng là một thách thức kỹ thuật cần được nghiên cứu thêm.

Bên cạnh những thách thức, mô hình giải nhiệt dạng lớp mang lại nhiều cơ hội. Sự phát triển của công nghệ in 3D và các vật liệu tiên tiến có thể giảm chi phí sản xuất và tăng độ chính xác của các kênh làm mát [8]. Ngoài ra, việc tích hợp các cảm biến nhiệt độ và hệ thống điều khiển thông minh vào khuôn có thể giúp tối ưu hóa quá trình làm mát theo thời gian thực, từ đó nâng cao hiệu quả sản xuất [13]. Đặc biệt, với các sản phẩm dạng lõm, mô hình giải nhiệt dạng lớp có thể cải thiện đáng kể chất lượng sản phẩm và giảm tỷ lệ phế phẩm, mang lại lợi ích kinh tế lớn cho các nhà sản xuất.

Nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế, chế tạo, và thử nghiệm mô hình giải nhiệt dạng lớp cho lòng khuôn sản xuất các sản phẩm dạng lõm. Các mục tiêu cụ thể bao gồm: (1) phát triển thiết kế kênh làm mát dạng lớp phù hợp với hình dạng lõm phức tạp, (2) sử dụng công nghệ in 3D để chế tạo khuôn thử nghiệm, (3) tiến hành mô phỏng và thực nghiệm để đánh giá hiệu suất làm mát, và (4) so sánh hiệu quả của hệ thống giải nhiệt dạng lớp với các hệ thống truyền thống. Nghiên cứu sẽ sử dụng các phương pháp mô phỏng truyền nhiệt và dòng chảy, kết hợp với thử nghiệm thực tế trên các mẫu khuôn để xác nhận tính khả thi của giải pháp. Kết quả nghiên cứu dự kiến sẽ cung cấp một hướng đi mới cho việc cải tiến hệ thống giải nhiệt trong khuôn đúc, đặc biệt là trong sản xuất các sản phẩm dạng lõm.

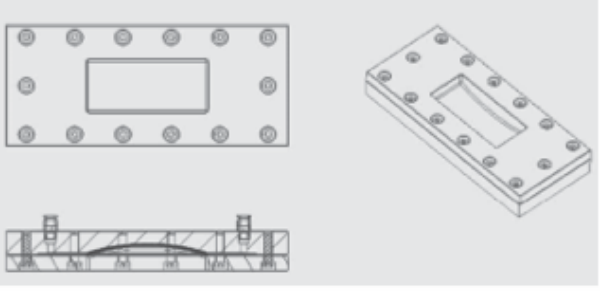
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

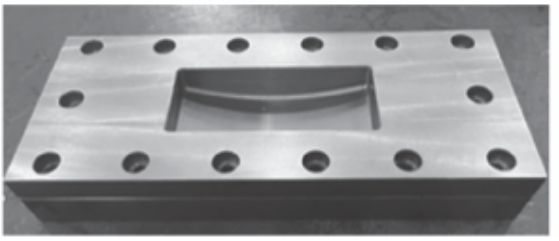
Các kỹ thuật ép phun hiện tại cần cải thiện để đáp ứng yêu cầu về hình dạng phức tạp và chất lượng cao. Quản lý nhiệt độ khuôn

là một chiến lược hữu ích. Nhiều nghiên cứu đã thực hiện về các kỹ thuật kiểm soát nhiệt độ khuôn nhằm tăng nhiệt độ khoang khuôn nhưng vẫn duy trì thời gian chu kỳ ngắn. Các kỹ thuật như sưởi ấm bằng tia hồng ngoại, lửa, laser, cảm ứng và khí nóng được đề xuất để nâng cao hiệu quả và giảm tiêu thụ năng lượng. Sưởi ấm bằng tia hồng ngoại tăng độ bền sản phẩm, trong khi sưởi ấm bằng laser nhanh chóng nhưng chỉ phù hợp cho các sản phẩm nhỏ. Giải nhiệt khuôn dạng lớp dựa trên nguyên lý tăng diện tích tiếp xúc giữa dòng chất làm mát và bề mặt khuôn. Khi các kênh giải nhiệt được thiết kế theo biên dạng sản phẩm, sự truyền nhiệt trở nên hiệu quả và đồng đều hơn, giảm thiểu sự chênh lệch nhiệt trong khuôn.

Lý thuyết truyền nhiệt đối lưu và dẫn nhiệt được áp dụng để tính toán nhiệt lượng trao đổi, trong đó phương trình Fourier và định luật Newton về đối lưu được sử dụng để xác định tốc độ làm mát tối ưu. Đồng thời, nguyên lý chia lớp khuôn để lắp ghép và tích hợp các kênh làm mát cũng được xem xét về mặt cơ khí.

3. MÔ HÌNH MÔ PHỎNG



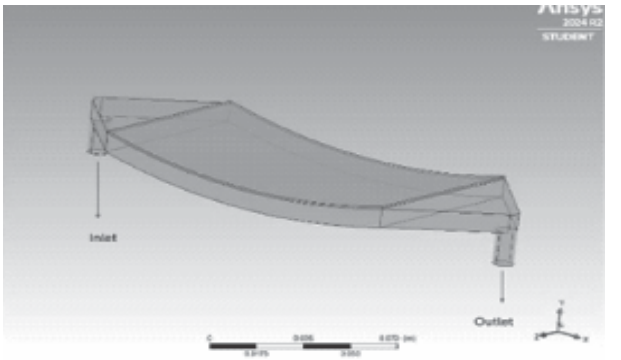


Hình 3.1. Thiết kế của hệ thống cooling layer

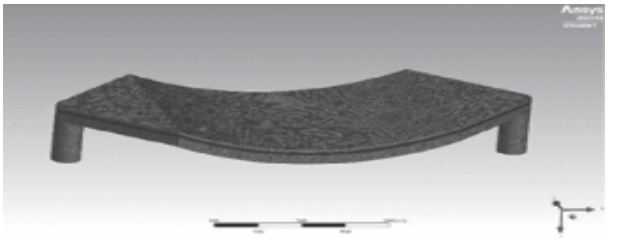
Thiết kế của hệ thống cooling layer được thiết kế gồm 2 tấm. Tấm Insert với kích thước dày 1mm, 1,8mm, 1-1,8mm. Tấm Water có kích thước 3, 5, 8mm.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Để nghiên cứu phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn, một mô hình mô phỏng chi tiết đã được xây dựng. Phần mềm ANSYS được sử dụng để nghiên cứu quá trình làm nóng Ex-GMTC và tái tạo điều kiện biên thí nghiệm. Với nhiệt độ môi trường là 25°C và hệ số truyền nhiệt là 10 W/m²K, tất cả các bề mặt bên ngoài của tấm khuôn được cấu hình cho đối lưu tự do vào không khí như là phương thức truyền nhiệt. Để cải thiện hiệu quả làm nóng, một tấm chèn cũng được tích hợp vào bộ thiết lập thí nghiệm gần trung tâm khoang. Mô phỏng sử dụng khoảng nhiệt độ từ 40°C đến 80°C cho đầu vào khí. Hình 4 là mô hình lưới bằng phần mềm ANSYS.



Hình 4.1. Thiết lập đầu vào và đầu ra cho quá trình mô phỏng



Hình 4.2. Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong nghiên cứu này, mô hình lưới được áp dụng nhằm đánh giá quá trình làm nóng của khuôn, với nhiệt độ nước làm nóng được đặt ở mức 40°C và thời gian gia nhiệt là 30 giây. Mục đích chính là tìm ra hình dạng tối ưu cho quá trình làm nóng, nhằm đảm bảo nhiệt độ phân bố đồng đều và tối ưu hóa khả năng truyền nhiệt của khuôn. Nhiều loại nắp khí khác nhau đã được thử nghiệm để đánh giá hiệu quả của từng thiết kế nắp trong việc kiểm soát sự lan truyền nhiệt và tăng cường tốc độ truyền nhiệt.

Kết quả thực nghiệm và mô phỏng cho thấy rằng, nhiệt độ tối đa đạt được khi sử dụng khoảng cách tiêm ngắn hơn, giúp nâng cao hiệu quả hấp thụ nhiệt của tấm khuôn. Các thử nghiệm chỉ ra rằng, khi khoảng cách tiêm giảm, sự trao đổi nhiệt giữa bề mặt khuôn và môi chất làm nóng diễn ra mạnh hơn, dẫn đến sự gia tăng đáng kể của nhiệt độ tại các vị trí gần vùng tiêm.

Phần kết quả và thảo luận đã chỉ ra hiệu quả đáng kể của hệ thống giải nhiệt dạng lớp trong việc cải thiện sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn. Các kết quả mô phỏng được thực hiện với nhiệt độ nước 40°C trong 30 giây đã phản ánh sự gia tăng nhiệt độ cả theo phương dọc (Y) lẫn phương ngang (X). Đặc biệt, tại các vị trí gần tâm khuôn, nhiệt độ tăng nhanh và đạt đỉnh cao, trong khi ở vùng biên, nhiệt độ tăng chậm hơn.

Bảng 1. Bảng thông số kết quả của quá trình mô phỏng 5s

	Y0	Y15	Y30	Y45	Y60	X30	X35	X70	X105	X140
1	31.1	30.6	30.7	31.1	31.2	33.9	35.7	34.6	34.1	32.4
2	31.7	31.2	31.3	31.8	32	34.1	35.9	34.9	34.5	32.8
3	32.5	32	31.9	32.5	32.7	34.2	36.1	35.2	34.9	33.2
4	33.3	32.8	32.5	33.2	33.5	34.3	36.3	35.5	35.2	33.5
5	34.1	33.6	33.1	34	34.2	34.3	36.4	35.7	35.4	33.7
6	34.8	34.3	33.6	34.6	35	34.2	36.3	35.7	35.5	33.8
7	35.2	34.6	33.9	35	35.2	34	36.3	35.7	35.6	33.8
8	35.5	35	34.2	35.3	35.4	33.9	36.3	35.7	35.6	33.9
9	35.9	35.3	34.5	35.7	35.7	33.8	36.2	35.5	35.5	33.8
10	36.3	35.7	34.8	36	35.9	33.7	36	35.2	35.1	33.7
11	36.4	35.9	34.8	36	36	33.7	35.7	34.9	34.7	33.6
12	36.4	36.2	34.8	36	36.1	33.6	35.5	34.6	34.3	33.5
13	36.5	36.4	34.8	36	36.2	33.6	35.4	34.3	34	33.3
14	36.6	36.7	34.8	36	36.3	33.6	35.2	34	33.7	33.1
15	36.7	36.7	34.8	36	36.2	33.6	35.1	33.6	33.5	32.9
16	36.7	36.8	34.7	36	36.2	33.6	34.9	33.3	33.2	32.8
17	36.8	36.9	34.6	36	36.2	33.6	34.8	33	33	32.6
18	36.8	37	34.6	36	36.1	33.5	34.6	32.7	32.7	32.4
19	36.8	36.9	34.6	36	36	33.5	34.5	32.4	32.5	32.2

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

20	36.8	36.9	34.7	36	36	33.5	34.3	32.2	32.2	32.1
21	36.7	36.9	34.7	35.9	35.9	33.4	34.1	32	32	31.9
22	36.7	36.9	34.7	35.9	35.8	33.3	34	32	31.9	31.7
23	36.7	36.8	34.6	35.8	35.8	33.3	33.8	32	31.8	31.5
24	36.7	36.8	34.6	35.7	35.7	33.2	33.6	32	31.7	31.3
25	36.6	36.7	34.5	35.7	35.7	33.1	33.5	32.1	31.7	31.2
26	36.6	36.7	34.4	35.6	35.6	33.1	33.4	32.1	31.7	31.3
27	36.6	36.6	34.3	35.6	35.6	33.1	33.4	32.2	31.8	31.4
28	36.6	36.5	34.3	35.5	35.5	32.4	33.3	32.2	31.8	31.5
29	36.6	36.4	34.2	35.5	35.4	32.4	33.3	32.3	32	31.6
30	36.6	36.3	34.2	35.5	35.4	32.4	33.4	32.4	32.3	31.7

Dữ liệu bảng kết quả phản ánh rằng tại các vị trí trung tâm, chẳng hạn Y0, nhiệt độ có thể đạt tới 36.8°C, trong khi ở các vùng biên chỉ đạt khoảng 31-33°C. Hiện tượng phân bố nhiệt tập trung này được lý giải là do thiết kế của kênh giải nhiệt dạng "bám sát biên dạng" (conformal cooling). Thiết kế này cho phép các dòng nước làm nóng di chuyển gần sát bề mặt khuôn, từ đó đảm bảo khả năng truyền nhiệt nhanh và đồng đều.

Để trực quan hóa xu hướng nhiệt độ theo thời gian, biểu đồ dưới đây thể hiện diễn biến nhiệt độ tại hai vị trí dọc quan trọng: Y0 (tâm) và Y30 (gần biên).

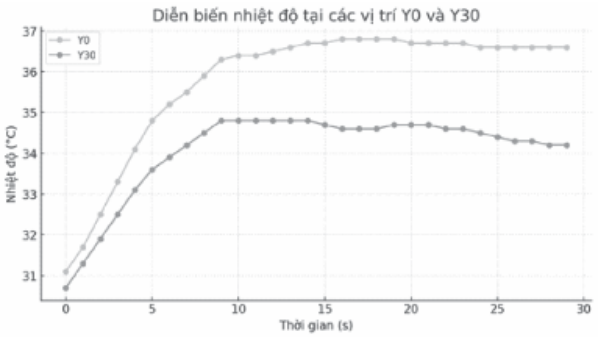
Biểu đồ trên cho thấy rõ ràng rằng nhiệt độ tại vị trí trung tâm (Y0) tăng đều đặn và đạt giá trị cao nhất (gần 37°C), trong khi vị trí Y30 cũng tăng theo thời gian nhưng chậm hơn, chỉ đạt khoảng 34°C. Sự khác biệt này chứng minh tính ưu việt của hệ thống kênh giải nhiệt dạng lớp ở vùng trung tâm so với vùng biên.

Bên cạnh đó, để so sánh sự phân bố nhiệt độ theo phương ngang, biểu đồ sau đây mô tả sự thay đổi nhiệt độ ở hai vị trí X30 và X70.

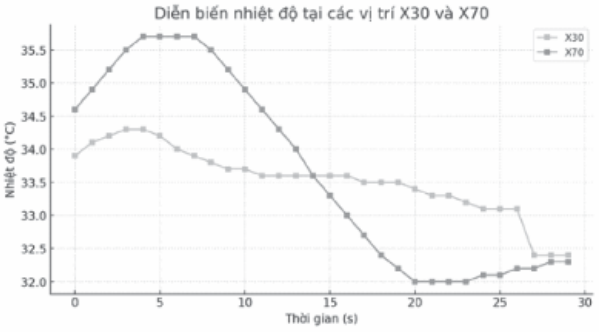
Qua biểu đồ, có thể thấy nhiệt độ tại X30 duy trì ở mức khá ổn định trong khoảng 33-34°C, trong khi X70 có xu hướng tăng nhanh hơn, đạt đỉnh gần 35.5°C. Điều này chứng minh rằng các kênh làm mát dạng lớp bố trí tại các vị trí ngang có thể điều tiết nhiệt độ hiệu quả, đảm bảo nhiệt độ ổn định trong suốt quá trình gia nhiệt.

Việc thử nghiệm nhiều loại nắp khí với khoảng cách tiêm khác nhau cũng chỉ ra rằng thiết kế tiêm ngắn giúp tăng cường hiệu suất truyền nhiệt, từ đó rút ngắn thời gian làm nóng khuôn. Điều này đặc biệt quan trọng trong chu trình ép phun, bởi thời gian chu trình càng ngắn, năng suất sản xuất càng cao.

Tóm lại, kết quả mô phỏng và đo đạc cho thấy rõ ràng rằng thiết kế hệ thống kênh làm mát dạng lớp và cấu trúc chèn của khuôn có vai trò quyết định trong việc kiểm soát nhiệt độ bề mặt. Thiết kế hợp lý không chỉ giúp giảm thời gian gia nhiệt mà còn đảm bảo phân bố nhiệt đều, tránh hiện tượng nứt hoặc biến dạng khuôn do chênh lệch nhiệt độ.



Hình 5.1. Thay đổi nhiệt độ theo thời gian gia nhiệt



Hình 5.2. Thay đổi nhiệt độ khi giải nhiệt

6. KẾT LUẬN

Việc áp dụng thiết kế giải nhiệt dạng lớp cho khuôn có sản phẩm dạng lõm mang lại hiệu quả rõ rệt về mặt truyền nhiệt, giảm thời gian chu kỳ và cải thiện chất lượng sản phẩm. Hướng phát triển tiếp theo sẽ tập trung vào việc kết hợp công nghệ in 3D kim loại để chế tạo các kênh có hình dạng phức tạp hơn và giảm chi phí gia công.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Đặng Hùng Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Vy Lăng Thiên Phước, Nguyễn Tiến Dũng, Trần Thanh Thưởng, Nguyễn Trà Kim Quyên;

- Tác giả liên hệ: Nguyễn Trà Kim Quyên.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số:SV2025-353.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **22/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Dimla, D. E., Camilotto, M., & Miani, F. (2005), "*Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*". Journal of Materials Processing Technology, 164-165, 1294-1300. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.162

[2]. European Commission. (2019a), "*A vision for the European industry until 2030: Final report of the Industry 2030 High Level Industrial Roundtable*". https://data.europa.eu/doi/10.2873/102179

[3]. European Commission (2019b), "*Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones*". El Pacto Verde Europeo (In Spanish). [Google Scholar]

[4]. Kirchheim, A., Katrodiya, Y., Zumofen, L., Ehrig, F., & Wick, C. (2021), "*Dynamic conformal cooling improves injection molding*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 114, 107-116. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06839-0

[5]. Liu, H., Zhang, X., Quan, L., & Zhang, H. (2020), "*Research on energy consumption of injection molding machine driven by five different types of electro-hydraulic power units*". Journal of Cleaner Production, 242, 118355. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118355

[6]. Malloy, R. A. (2012) , "*Plastic part design for injection molding: An introduction*". Carl Hanser Verlag.

[7]. Mathey, E., Penazzi, L., Schmidt, F. M., & Rondé-Oustau, F. (2004), "*Automatic optimization of the cooling of injection mold based on the boundary element method*". AIP Conference Proceedings, 712, 222-227. https://doi.org/10.1063/1.1766527

[8]. Mazur, M., Brincat, P., Leary, M., & Brandt, M. (2017), "*Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93, 881-900. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0426-7

[9]. Meckley, J., & Edwards, R. (2009), "*A study on the design and effectiveness of conformal cooling channels in rapid tooling inserts*". Technology Interface Journal, 10, 1-28.

[10]. Menges, G., Michaeli, W., & Mohren, P. (2001), "*How to make injection molds*". Hanser Publishers.

[11]. Mercado-Colmenero, J. M., Muriana, J. A. M., Rubio-Paramio, M. A., & Martín-Doñate, C. (2016), "*An automated manufacturing analysis of plastic parts using faceted surfaces*". In Advances on mechanics, design engineering and manufacturing (pp. 119-128). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_11

[12]. Mercado-Colmenero, J. M., Rubio-Paramio, M. A., Karlinger, P., & Martin-Doñate, C. (2018a) , "*A new method for the automated design of cooling systems in injection molds*". Computer-Aided Design, 104, 60–86. https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.06.007

[13]. Mercado-Colmenero, J. M., Rubio-Paramio, M. A., & Martin-Doñate, C. (2018b), "*A new procedure for calculating cycle time in injection molding based on plastic part geometry recognition*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 98, 441-477. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2326-7

[14]. Park, H. S., & Dang, X. P. (2010), "*Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold*". International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11, 879-890. https://doi.org/10.1007/s12541-010-0107-z

THỰC NGHIỆM ĐO NHIỆT ĐỘ LÒNG KHUÔN DẠNG PHẲNG

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF TEMPERATURE IN FLAT MOLD CAVITIES

Nguyễn Tấn Đạt, Trần Thanh Lam, Huỳnh Nguyễn Hoàng, Lê Thanh Tùng*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21144378@student.hcmute.edu.vn;
lamtt@hcmute.edu.vn;
hoanghn@hcmute.edu.vn;
**tunglt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Trong quy trình ép phun nhựa, nhiệt độ khuôn đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất. Nghiên cứu này thực hiện khảo sát thực nghiệm về sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn hình chữ nhật và ảnh hưởng của nó đến các khuyết tật phổ biến như cong vênh, rỗ khí và sai lệch kích thước. Đặc biệt, các viên bi thép với kích thước khác nhau được sử dụng như một phương tiện để kiểm tra và so sánh tốc độ gia nhiệt trong mỗi chu kỳ ép, nhằm đánh giá hiệu quả truyền nhiệt của khuôn. Kết quả cho thấy sự chênh lệch nhiệt độ trong khuôn có ảnh hưởng trực tiếp đến độ đồng đều và chất lượng của sản phẩm nhựa. Việc kiểm soát tốt nhiệt độ không chỉ góp phần giảm thiểu lỗi sản phẩm mà còn nâng cao độ ổn định của quá trình ép và hiệu quả sản xuất tổng thể.

Từ khóa: *Phân bố nhiệt độ khuôn; Gia nhiệt khuôn; Nhiệt độ khuôn; Kiểm soát nhiệt độ khuôn.*

ABSTRACT

In the injection molding process, mold temperature plays a crucial role in ensuring product quality and production efficiency. This study conducts an experimental investigation on the temperature distribution within a rectangular mold cavity and its effects on common defects such as warpage, air traps, and dimensional deviations. Specifically, steel balls of varying sizes are used as a means to examine and compare the heating rate during each molding cycle, aiming to evaluate the mold's heat transfer efficiency. The results indicate that temperature variations within the mold have a direct impact on the uniformity and quality of plastic products. Proper temperature control not only helps minimize product defects but also enhances process stability and overall production performance.

Keywords: *Mold temperature distribution; Mold heating; Mold temperature; Mold temperature control.*

1. TỔNG QUAN

Ép phun là một trong những phương pháp gia công nhựa tiên tiến và phổ biến nhất hiện nay, được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất các chi tiết nhựa có hình dạng phức tạp với độ chính xác cao và năng suất lớn. Công nghệ này cho phép tạo ra các sản phẩm từ các chi tiết nhỏ như linh kiện điện tử đến các bộ phận lớn trong ngành công nghiệp ô tô và hàng không vũ trụ [1]. Sự thành công của quá trình ép phun phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó kiểm soát nhiệt độ khuôn là một trong những yếu tố then chốt ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm, hiệu suất sản xuất và độ bền của khuôn [2]. Nhiệt độ khuôn không chỉ tác động đến khả năng điền đầy nhựa vào lòng khuôn mà còn ảnh hưởng đến cấu trúc vi mô, tính chất cơ học và độ hoàn thiện bề mặt của sản phẩm [3]. Do đó, việc thực nghiệm đo và kiểm soát nhiệt độ lòng khuôn đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa quy trình ép phun, đặc biệt đối với khuôn dạng phẳng – một loại khuôn phổ biến trong sản xuất các sản phẩm nhựa dạng tấm hoặc chi tiết có độ dày đồng đều.

Trong quá trình ép phun, nhựa nóng chảy được bơm vào lòng khuôn với áp suất cao, sau đó được làm nguội để tạo hình sản phẩm. Nhiệt độ của nhựa nóng chảy khi tiếp xúc với lòng khuôn sẽ truyền một phần năng lượng nhiệt vào khuôn, làm tăng nhiệt độ của bề mặt khuôn [4]. Sau mỗi chu kỳ ép, nhiệt độ khuôn cần được điều chỉnh thông qua hệ thống làm mát để đảm bảo sản phẩm có thể được lấy ra dễ dàng mà không bị biến dạng, đồng thời duy trì độ bền và tuổi thọ của khuôn [5]. Tuy nhiên, để đảm bảo dòng nhựa chảy vào khuôn một cách trơn tru và điền đầy lòng khuôn mà không gây ra các khuyết tật như vết nối, bọt khí hay co ngót không đều, khuôn cần được gia nhiệt trở lại đến một mức nhiệt độ phù hợp trước chu kỳ ép tiếp theo [6]. Sự cân bằng giữa quá trình làm mát và gia nhiệt này đòi hỏi sự kiểm soát chính xác, đặc biệt đối với khuôn dạng phẳng, nơi nhiệt độ phân bố không đồng đều có thể dẫn đến các vấn đề về chất lượng sản phẩm.

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng nhiệt độ khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian chu kỳ ép, độ co ngót của sản phẩm và tính chất cơ học của nhựa [7]. Ví dụ, nhiệt độ khuôn quá thấp có thể làm tăng độ nhớt của nhựa, gây khó khăn trong việc điền đầy khuôn và dẫn đến các khuyết tật như dòng chảy không hoàn chỉnh hoặc bề mặt sản phẩm kém chất lượng. Ngược lại, nhiệt độ khuôn quá cao có thể kéo dài thời gian làm nguội, làm giảm năng suất và tăng nguy cơ biến dạng sản phẩm [8]. Do đó, việc đo lường và kiểm soát nhiệt độ lòng khuôn trong suốt quá trình ép phun là một nhiệm vụ quan trọng, đòi hỏi sự kết hợp giữa các phương pháp thực nghiệm và mô phỏng số để hiểu rõ hơn về sự phân bố nhiệt độ và tác động của nó đến chất lượng sản phẩm.

Trong các thí nghiệm đo nhiệt độ khuôn, các cảm biến nhiệt độ (thermocouple) thường được sử dụng để theo dõi sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí khác nhau trên bề mặt khuôn, bao gồm cả khu vực gần kênh dẫn nhựa và các vùng xa hơn [9]. Các thông số như nhiệt độ nước làm mát vào và ra, lưu lượng nước, và sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng trên khuôn được ghi nhận để đánh giá hiệu quả của hệ thống làm mát. Lưu lượng nước làm mát đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì nhiệt độ khuôn ổn định, đặc biệt trong các chu kỳ ép liên tục, nơi nhiệt độ khuôn có thể tăng dần do tích lũy nhiệt từ nhựa nóng chảy [10]. Ngoài ra, các yếu tố như thiết kế kênh làm mát, loại chất lỏng làm mát (nước, dầu hoặc khí), và vật liệu khuôn cũng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng kiểm soát nhiệt độ. Đối với khuôn dạng phẳng, ☞

thiết kế kênh làm mát cần được tối ưu hóa để đảm bảo sự phân bố nhiệt độ đồng đều trên toàn bộ bề mặt khuôn, từ đó giảm thiểu các khuyết tật do chênh lệch nhiệt độ.

Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc sử dụng các công nghệ tiên tiến để cải thiện khả năng kiểm soát nhiệt độ khuôn. Ví dụ, các hệ thống làm mát thích nghi (adaptive cooling) sử dụng cảm biến và phần mềm điều khiển để tự động điều chỉnh lưu lượng và nhiệt độ chất lỏng làm mát dựa trên dữ liệu thời gian thực [1]. Ngoài ra, các phương pháp mô phỏng nhiệt dựa trên phần mềm như Moldflow hoặc ANSYS đã được áp dụng để dự đoán sự phân bố nhiệt độ và tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát trước khi chế tạo khuôn [2]. Tuy nhiên, các phương pháp này thường yêu cầu đầu tư lớn về thiết bị và phần mềm, khiến chúng khó áp dụng trong các cơ sở sản xuất quy mô nhỏ hoặc trung bình. Do đó, các nghiên cứu thực nghiệm đơn giản nhưng hiệu quả, như đo nhiệt độ lòng khuôn bằng cảm biến nhiệt độ, vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp dữ liệu thực tế để cải thiện quy trình ép phun.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu thực nghiệm đo nhiệt độ lòng khuôn dạng phẳng được thực hiện nhằm cung cấp dữ liệu chi tiết về sự phân bố nhiệt độ và hiệu quả của hệ thống làm mát trong quá trình ép phun. Mục tiêu chính của nghiên cứu là xác định các thông số tối ưu cho hệ thống làm mát, bao gồm nhiệt độ nước vào/ra và lưu lượng nước, để đảm bảo khuôn đạt được nhiệt độ phù hợp cho mỗi chu kỳ ép. Các thí nghiệm được tiến hành bằng cách đặt các cảm biến nhiệt độ tại các vị trí chiến lược trên khuôn, chẳng hạn như gần cổng phun, vùng trung tâm và vùng biên, để ghi nhận sự thay đổi nhiệt độ trong suốt chu kỳ ép. Dữ liệu thu thập được sẽ được phân tích để đánh giá mức độ chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng và hiệu quả của hệ thống làm mát trong việc duy trì sự ổn định nhiệt độ.

Kết quả từ các thí nghiệm này không chỉ giúp cải thiện chất lượng sản phẩm mà còn đóng góp vào việc giảm thời gian chu kỳ ép, từ đó tăng năng suất sản xuất. Hơn nữa, việc hiểu rõ sự phân bố nhiệt độ trên khuôn dạng phẳng có thể cung cấp thông tin hữu ích cho việc thiết kế khuôn và tối ưu hóa quy trình ép phun trong các ứng dụng thực tế. Các nghiên cứu tương tự trong quá khứ đã chỉ ra rằng việc kiểm soát nhiệt độ khuôn chính xác có thể giảm tỷ lệ sản phẩm lỗi từ 10-20% trong một số trường hợp [3]. Điều này đặc biệt quan trọng trong các ngành công nghiệp yêu cầu độ chính xác cao, như sản xuất linh kiện y tế hoặc điện tử.

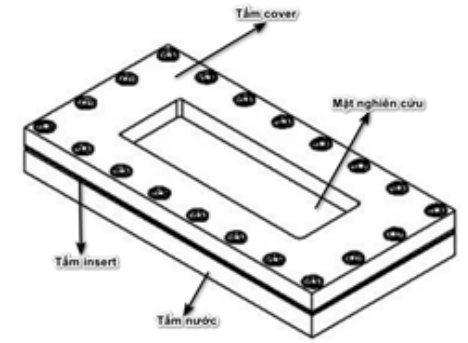
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong quy trình ép phun nhựa, quản lý nhiệt độ khuôn đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa chu kỳ sản xuất. Sau giai đoạn làm mát, quá trình gia nhiệt khuôn là bước quan trọng giúp chuẩn bị cho chu kỳ ép tiếp theo diễn ra ổn định và hiệu quả. Hiện nay, có nhiều phương pháp gia nhiệt khuôn được áp dụng, tùy thuộc vào đặc điểm khuôn, loại vật liệu nhựa và yêu cầu sản xuất. Phổ biến nhất là phương pháp gia nhiệt bằng điện trở, nhờ vào tính đơn giản, hiệu quả và dễ kiểm soát. Ngoài ra, các phương pháp như gia nhiệt bằng dầu hoặc nước nóng thông qua hệ thống tuần hoàn cũng được sử dụng để đảm bảo nhiệt độ ổn định và phân bố đều. Đối với những yêu cầu cao về tốc độ và độ chính xác, công nghệ gia nhiệt bằng cảm ứng đang được ứng dụng ngày càng nhiều nhờ khả năng làm nóng nhanh và hiệu quả. Bên cạnh đó, gia nhiệt bằng tia hồng ngoại cũng được áp dụng trong một số trường hợp đặc thù, nhất là khi cần tác động nhiệt cục bộ trên bề mặt khuôn.

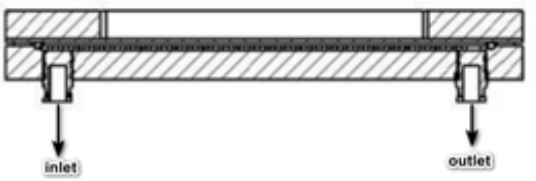
Tuy nhiên nghiên cứu này sử dụng phương pháp khác là sử dụng hệ thống gia nhiệt bằng nước nóng nhưng kết hợp với những viên bi thép có kích thước khác nhau để tập trung xem sự thay đổi nhiệt độ trong quá trình gia nhiệt khuôn.

3. THIẾT LẬP THIẾT BỊ ĐO

Thiết kế của tấm khuôn được trình bày ở trong Hình 1, việc quan sát nhiệt độ được quan sát thông qua khu vực nghiên cứu ở tại Hình 2. Khu vực nghiên cứu có kích thước và độ dày bằng với độ dày của tấm insert. Lấp đầy lòng khuôn bằng bi sắt trước khi tiến hành setup máy. Sử dụng các thiết bị có sẵn tại phòng thí nghiệm với setup như Hình 3.4 và 3.5, sử dụng 3 đồng hồ đo nhiệt tại 3 vị trí của tấm khuôn để có thể biết được nhiệt độ tại vị trí đầu vào, đầu ra và khu vực trung tâm. Thí nghiệm được thực hiện với nhiệt độ đầu vào của nước lần lượt là 40°C, 60°C, 80°C và thời gian gia nhiệt là 40 giây.



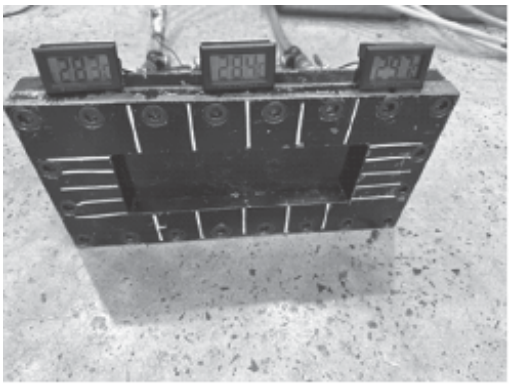
Hình 3.1. Thiết kế tấm khuôn



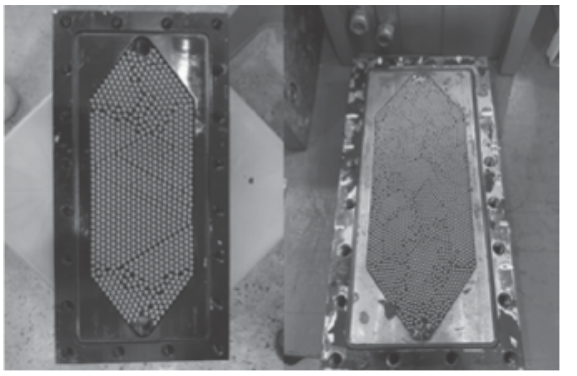
Hình 3.2. Vị trí đầu vào, đầu ra của nước



Hình 3.3. Kích thước khu vực nghiên cứu



Hình 3.4. Setup đồng hồ đo nhiệt



Hình 3.5. Bi được lắp đầy vào khu vực nước



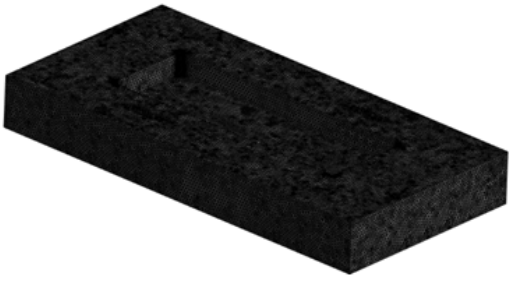
Hình 3.6. Setup máy và khu vực đo

4. PHƯƠNG PHÁP ĐO

Để nghiên cứu phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn, một mô hình mô phỏng chi tiết đã được xây dựng. Mô hình được xây dựng với ba bộ phận chính là tấm cover, tấm insert (với bề dày: 1mm, 1.8mm, nghiêng), tấm nước (với bề dày: 3mm, 5mm, 8mm). Mô hình được chia lưới nhỏ để tăng độ chính xác khi mô phỏng. Phần mềm ANSYS được sử dụng để nghiên cứu quá trình gia nhiệt diễn ra trong khuôn và tái tạo điều kiện biên thí nghiệm. Với nhiệt độ môi trường là 30°C và hệ số truyền nhiệt là 10 W/m²K, mô hình được thiết kế theo một tấm khuôn và khu vực nước đi vào nằm trong một khu vực có thể quan sát, dòng chảy hài hòa. Mô phỏng sử dụng nhiệt độ lần lượt là 40°C, 60°C và 80°C cho đầu vào nước. Mô hình lưới bằng phần mềm ANSYS được mô tả ở hình 4.2.



Hình 4.1. Thiết lập đầu vào và đầu ra cho nước trong phần mềm ANSYS để mô phỏng



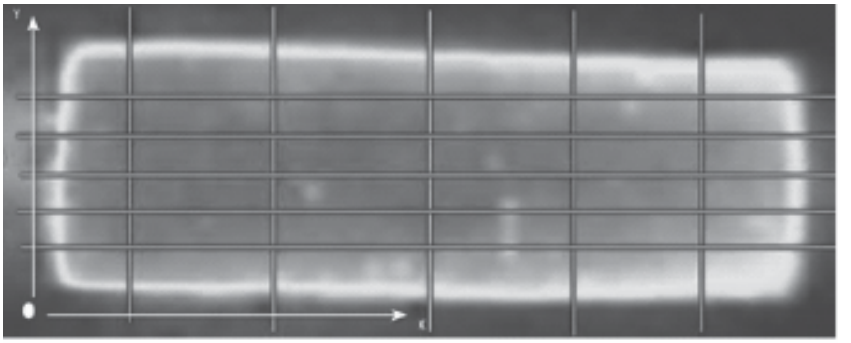
Hình 4.2. Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình được sử dụng để đánh giá phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn, nhiệt độ nước (TW) đặt ở 40°C 60°C 80°C, water thickness (WT) là 3mm 5mm 8mm, lưu lượng nước (F) 1.9 l/p 2.8 l/p 3 l/p, insert (IS) 1mm 1.8mm 1mm-1.8mm và thời gian gia nhiệt là 40 giây, để tìm hình dạng tốt nhất cho quá trình gia nhiệt. Kết quả cho thấy nhiệt độ tối đa đạt được là 76.1°C và nhiệt độ tối thiểu là 71.4°C. Mặt khác, các giá trị WT, F, TW, T khác nhau thì nhiệt độ phân bố trong lòng khuôn khác nhau. Những phát hiện này cho thấy giá trị của các bộ phận ảnh hưởng đáng kể đến phân bố nhiệt trong lòng khuôn.

Phần kết quả và thảo luận của nghiên cứu đã phân tích rõ ràng ảnh hưởng của các thông số như độ dày kênh nước (WT), lưu lượng nước (F), nhiệt độ nước đầu vào (TW) và thời gian gia nhiệt (T) đến sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn dạng phẳng. Mô phỏng được thực hiện với nhiệt độ nước đầu vào lần lượt là 40°C, 60°C và 80°C, thời gian gia nhiệt 40 giây, kết hợp với các biến đổi về độ dày insert và lưu lượng nước nhằm đánh giá tính đồng đều nhiệt độ. Kết quả đáng chú ý là ở điều kiện tối ưu (WT = 8 mm, F = 2.8 lít/phút, TW = 80°C), nhiệt độ cao nhất đạt 76.1°C và thấp nhất là 71.4°C – cho thấy biên độ chênh lệch nhỏ (4.7°C), chứng tỏ sự đồng đều nhiệt độ khá tốt. Biểu đồ nhiệt độ theo tọa độ X-Y cho thấy mức tăng nhiệt đều đặn từ đầu vào đến trung tâm và giảm nhẹ ở phần biên, phản ánh tính chất truyền nhiệt lan tỏa. Đặc biệt, việc sử dụng bi thép lấp đầy khuôn hỗ trợ hiệu quả cho việc kiểm tra độ truyền nhiệt và lưu giữ nhiệt độ khuôn trong thời gian ngắn. Nhờ đó, nhóm nghiên cứu đã xác định được rằng yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến phân bố nhiệt là nhiệt độ đầu vào và lưu lượng nước. Điều này chứng minh tính khả thi của hệ thống gia nhiệt bằng nước kết hợp với thiết kế kênh giải nhiệt dạng lớp trong việc đảm bảo điều kiện nhiệt tối ưu cho quy trình ép phun. Qua đó, kết quả nghiên cứu mang lại giá trị thực tiễn cao, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất trong công nghệ chế tạo khuôn mẫu.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



Hình 5.1. Sự thay đổi nhiệt độ tại các điểm x,y trên tọa độ xOy

Bảng 1. Bảng thông số kết quả của quá trình mô phỏng

STT	WT (mm)	F (lit/min)	TW (°C)	T (s)	X	Y	Nhiệt độ
1	8	2.8	80	40	95	0	71.4
2	8	2.8	80	40	95	1	72
3	8	2.8	80	40	95	2	72.7
4	8	2.8	80	40	95	3	73.2
5	8	2.8	80	40	95	4	73.6
6	8	2.8	80	40	95	5	73.9
7	8	2.8	80	40	95	6	74.3
8	8	2.8	80	40	95	7	74.6
9	8	2.8	80	40	95	8	74.8
10	8	2.8	80	40	95	9	75
11	8	2.8	80	40	95	10	75.2
12	8	2.8	80	40	95	11	75.3
13	8	2.8	80	40	95	12	75.5
14	8	2.8	80	40	95	13	75.6
15	8	2.8	80	40	95	14	75.7
16	8	2.8	80	40	95	15	75.8
17	8	2.8	80	40	95	16	75.9
18	8	2.8	80	40	95	17	76
19	8	2.8	80	40	95	18	76.1
20	8	2.8	80	40	95	19	76.1
21	8	2.8	80	40	95	20	76.1
22	8	2.8	80	40	95	21	76
23	8	2.8	80	40	95	22	75.9
24	8	2.8	80	40	95	23	75.9
25	8	2.8	80	40	95	24	75.9

6. KẾT LUẬN

Để đánh giá phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn bằng việc sử dụng hệ thống gia nhiệt, giải nhiệt với các biến WT, F, TW, T, nghiên cứu này đã tiến hành các tính toán và thí nghiệm độc lập. Chín trường hợp các giá trị biến được ngẫu nhiên với nhau theo phương pháp Taguchi để xác định các thông số quan trọng nhất và mức giá trị tối ưu của chúng. Ảnh hưởng của lớp giải nhiệt đến phân bố nhiệt độ bề mặt khuôn cho thấy được khả năng của phương pháp gia nhiệt sử dụng nước và kênh giải nhiệt dạng 3D, tìm ra được nhược và ưu điểm của hệ thống thiết kế làm mát từ đó có áp dụng vào lĩnh vực công nghệ khuôn mẫu. Kết quả nghiên cứu của việc gia nhiệt bằng nước nóng, kênh giải nhiệt theo hình dạng sản phẩm giúp tăng khả năng gia nhiệt đồng đều đối với những sản phẩm giúp ích cho ngành công nghệ khuôn mẫu.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Đặng Hùng Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Tấn Đạt, Trần Thanh Lam, Huỳnh Nguyễn Hoàng, Lê Thanh Tùng;

- Tác giả liên hệ: Lê Thanh Tùng.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-346.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **22/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bianchi, M. F., Gameros, A. A., Axinte, D. A., Lowth, S., Cendrowicz, A. M., & Welch, S. T. (2019), "*On the effect of mould temperature on the orientation and packing of particles in ceramic injection moulding*". Journal of the European Ceramic Society, 39(10), 3194-3207. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.04.025

[2]. Zheng, R., Tanner, R. I., & Fan, X.-J. (2011), "*Injection molding: Integration of theory and modeling methods*". Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21163-8.

[3]. Shengjie, Y., Li, Q. F., & Yong, M. S. (2006), "*Method for determination of critical powder loading for powder-binder processing*". Powder Metallurgy, 49(3), 219-223. https://doi.org/10.1179/174329006X146418

[4]. Uematsu, K., Ohsaka, S., Shinohara, N., & Okumiya, M. (1997), "*Grain-oriented microstructure of alumina ceramics made through the injection molding process*". Journal of the American Ceramic Society, 80(5), 1313-1315. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1997.tb02977.x

[5]. Wang, X., Zhao, G., & Wang, G. (2014), "*Optimal design of heating system for rapid thermal cycling mold using particle swarm optimization and finite element method*". Applied Thermal Engineering, 64(1-2), 462-470. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.028

[6]. Wang, X., Zhao, G., & Wang, G. (2013), "*Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process*". Materials & Design, 47, 779-792. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.047

[7]. Wang, G., Zhao, G., & Wang, X. (2013), "*Effects of cavity surface temperature on mechanical properties of specimens with and without a weld line in rapid heat cycle molding*". Materials & Design, 46, 457-472. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.054

[8]. Somé, S. C., Delaunay, D., Faraj, J., Bailleul, J.-L., Boyard, N., & Quilliet, S. (2015), "*Modeling of the thermal contact resistance time evolution at polymer–mold interface during injection molding: Effect of polymers' solidification*". Applied Thermal Engineering, 84, 150-157. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.037

[9]. Dong, Y., Li, X., Zhao, Q., Yang, J., & Dao, M. (2017), "*Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades*". Journal of Materials Processing Technology, 244, 190-203. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.005

[10]. Gromada, M., Świeca, A., Kostecki, M., Olszyna, A., & Cygan, R. (2015), "*Ceramic cores for turbine blades via injection moulding*". Journal of Materials Processing Technology, 220, 107-112. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.010

ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ ĐẾN KÍCH THƯỚC ĐƯỜNG HÀN

INFLUENCE OF PARAMETERS ON WELD IMPERFECTION SIZE

Nguyễn Sỹ Huy, Nguyễn Phan Anh, Huỳnh Quang Duy, Phan Thanh Nhàn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 21143352@student.hcmute.edu.vn; anhnp@hcmute.edu.vn; duyhq@hcmute.edu.vn; *nhanpt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Hàn quỹ đạo là công nghệ hàn đường ống được ứng dụng rộng rãi trong các dây chuyền công nghiệp. Tuy nhiên, các mối nối có nguy cơ rò rỉ, gây nhiễm khuẩn hoặc nguy hiểm nếu đường ống vận chuyển khí đốt, axit hoặc chất lỏng độc hại. Rò rỉ cũng làm giảm hiệu suất sản xuất. Vì vậy, công nghệ hàn quỹ đạo cần được cải tiến để khắc phục các vấn đề này. Vào những năm 1960, hàn quỹ đạo ra đời trong ngành hàng không vũ trụ để đáp ứng nhu cầu về kỹ thuật nối ống chất lượng cao cho hệ thống thủy lực máy bay. Thiết bị sử dụng điện cực vonfram xoay quanh ống, tạo hồ quang làm nóng chảy kim loại, hình thành mối hàn. Quá trình này được tự động hóa với hệ thống điều khiển dòng hàn, mang lại độ chính xác và độ tin cậy vượt trội so với hàn thủ công. Đến những năm 1980, hàn quỹ đạo trở nên phổ biến nhờ hệ thống điều khiển điện 110V AC và thiết bị nhỏ gọn, dễ di chuyển. Hiện nay, hệ thống hàn quỹ đạo hiện đại được điều khiển bằng máy tính, lưu trữ thông số hàn, tạo ra các mối hàn đồng nhất với ít khuyết tật. Công nghệ này được sử dụng trong các ngành như hàng không vũ trụ, thực phẩm, dược phẩm, nguyên tử và bán dẫn.

Từ khóa: *Thông số hàn; Hàn hồ quang; Kích thước đường hàn; Cường độ dòng điện; Vận tốc hàn; Hàn ống.*

ABSTRACT

Orbital welding is a technology used for welding pipelines, widely applied in industrial production lines. However, joints in these pipelines may leak, causing contamination or posing dangers if the pipelines transport gas, acids, or other hazardous liquids. Leaks also reduce production efficiency. Therefore, orbital welding technology needs improvements to address these issues. In the 1960s, orbital welding was developed in the aerospace industry to meet the demand for high-quality pipe-joining techniques for aircraft hydraulic systems. The equipment uses a tungsten electrode rotating around the pipe, creating an arc that melts the base metal to form a weld. The welding process is automated with a control system for weld current, offering superior precision and reliability compared to manual welding. By the 1980s, orbital welding gained popularity due to 110V AC control systems and compact, portable equipment. Modern orbital welding systems are computer-controlled, storing welding parameters to produce consistent welds with minimal defects. This technology is now used in industries such as aerospace, food, pharmaceuticals, nuclear, and semiconductors.

Keywords: *Welding Parameters; Arc Welding; Weld Imperfection Size; Current Intensity; Welding Speed; Pipe Welding.*

1. TỔNG QUAN

Hàn quỹ đạo là một kỹ thuật hàn tiên tiến, được ứng dụng rộng rãi trong việc nối các hệ thống đường ống, đặc biệt trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và độ tin cậy cao [1]. Công nghệ này sử dụng đầu hàn tự động xoay quanh ống để tạo ra mối hàn đồng nhất, đảm bảo chất lượng vượt trội và khả năng lặp lại trong các điều kiện sản xuất phức tạp [2]. Với khả năng đáp ứng các yêu cầu khắt khe, hàn quỹ đạo đã trở thành một giải pháp không thể thiếu trong nhiều lĩnh vực như hàng không vũ trụ, năng lượng, thực phẩm, dược phẩm, bán dẫn, và dầu khí ngoài khơi [3]. Phần tổng quan này sẽ trình bày các ứng dụng chính của hàn quỹ đạo, tầm quan trọng của việc tối ưu hóa thông số hàn, và định hướng nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả của công nghệ này.

Hàn quỹ đạo được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng tạo ra các mối hàn chất lượng cao trong các môi trường và điều kiện khác nhau. Trong ngành hàng không vũ trụ, hàn quỹ đạo được sử dụng để thực hiện hơn 1.500 mối hàn áp suất cao trên các hệ thống đường ống của máy bay, đảm bảo tính đồng nhất và độ bền cơ học vượt trội [2]. Các mối hàn này phải đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt về độ an toàn và hiệu suất trong điều kiện vận hành khắc nghiệt [4].

Trong lĩnh vực năng lượng, hàn quỹ đạo được áp dụng để nối các ống lò hơi trong nhà máy điện. Đầu hàn quỹ đạo nhỏ gọn cho phép thực hiện các mối hàn chất lượng cao trong không gian hạn chế, đồng thời đảm bảo khả năng lặp lại và độ bền của mối hàn [3]. Ngành thực phẩm, sữa, và đồ uống yêu cầu các mối hàn ngấu hoàn toàn với bề mặt mịn để ngăn ngừa sự tích tụ vi khuẩn, đáp ứng các tiêu chuẩn vệ sinh tại chỗ (clean-in-place) [5]. Các mối hàn này giúp đảm bảo an toàn thực phẩm và kéo dài tuổi thọ của hệ thống đường ống.

Trong ngành dược phẩm, hàn quỹ đạo được sử dụng để chế tạo các hệ thống đường ống dẫn nước tinh khiết và các chất lỏng không nhiễm khuẩn. Các mối hàn phải đạt độ mịn cao để tránh ô nhiễm, đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt của ngành [6]. Tương tự, ngành bán dẫn yêu cầu các mối hàn siêu mịn để ngăn chặn tích tụ hạt bụi, đảm bảo độ tinh khiết của môi trường sản xuất vi mạch [7]. Ngoài ra, hàn quỹ đạo còn được ứng dụng trong ngành hạt nhân để tạo ra các mối hàn chịu được môi trường nhiệt độ cao và bức xạ [8], cũng như trong các hệ thống thủy lực ngoài khơi để cải thiện khả năng chống ăn mòn và độ bền cơ học [9].

Hàn quỹ đạo cũng đóng vai trò quan trọng trong việc chế tạo các phụ kiện, van, và bộ điều áp. Công nghệ này giúp nâng cao năng suất và chất lượng tại các vị trí hàn phức tạp, nơi các phương pháp hàn thủ công khó thực hiện [10]. Sự đa dạng trong ứng dụng của hàn quỹ đạo chứng minh tính linh hoạt và tiềm năng của công nghệ này trong việc đáp ứng nhu cầu của các ngành công nghiệp hiện đại.

Sự gia tăng nhu cầu về hệ thống đường ống chất lượng cao trong các ngành công nghiệp đã thúc đẩy sự phát triển của hàn quỹ đạo [11]. Để đáp ứng các yêu cầu về năng suất, độ bền, và tính toàn vẹn của mối hàn, việc nghiên cứu và tối ưu hóa các thông số hàn là cần thiết. Các thông số chính bao gồm cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, góc điện cực, thời gian xung, và chiều dài hồ quang, đều ảnh hưởng trực tiếp đến kích thước và hình dạng mối hàn [12].

Kích thước mối hàn, bao gồm chiều rộng, chiều sâu, và hình dạng tổng thể, đóng vai trò quan trọng trong việc xác định độ bền

cơ học và khả năng chịu tải của mối hàn. Ví dụ, một mối hàn quá rộng có thể làm giảm độ bền do sự gia tăng ứng suất nhiệt, trong khi mối hàn quá nông có thể không đảm bảo độ ngấu cần thiết. Do đó, việc kiểm soát chính xác các thông số hàn là yếu tố then chốt để đạt được mối hàn chất lượng cao, đặc biệt trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như ngành hàng không vũ trụ và dược phẩm.

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng việc điều chỉnh các thông số hàn có thể cải thiện đáng kể chất lượng mối hàn. Theo Smith và cộng sự [12], việc tối ưu hóa tốc độ hàn và cường độ dòng điện có thể giảm thiểu các khuyết tật hàn như rỗ khí và nứt mối hàn. Tương tự, nghiên cứu của Lee và cộng sự [10] nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm soát thời gian xung để đảm bảo sự đồng nhất của hồ quang, từ đó cải thiện hình dạng mối hàn. Những phát hiện này cho thấy tiềm năng của việc nghiên cứu thực nghiệm để tối ưu hóa công nghệ hàn quỹ đạo.

Mặc dù hàn quỹ đạo mang lại nhiều lợi ích, công nghệ này vẫn đối mặt với một số thách thức. Thứ nhất, việc thiết lập các thông số hàn tối ưu đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về vật liệu, cấu trúc ống, và điều kiện vận hành [11]. Thứ hai, chi phí đầu tư cho thiết bị hàn quỹ đạo và đào tạo nhân sự có thể là rào cản đối với các doanh nghiệp vừa và nhỏ [10]. Thứ ba, việc duy trì độ ổn định của mối hàn trong các điều kiện khắc nghiệt, chẳng hạn như môi trường hạt nhân hoặc ngoài khơi, vẫn là một vấn đề cần nghiên cứu thêm [8].

Nghiên cứu "Thực nghiệm hàn quỹ đạo hở với các thông số hàn khác nhau" có ý nghĩa thực tiễn cao, nhằm giải quyết các thách thức này. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn đến kích thước và chất lượng mối hàn, từ đó đề xuất các giá trị tối ưu cho các ứng dụng thực tế. Các thí nghiệm sẽ được thực hiện trên hệ thống hàn quỹ đạo hở, sử dụng các vật liệu phổ biến như thép không gỉ và hợp kim titan, vốn được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp [9]. Kết quả nghiên cứu dự kiến sẽ cung cấp dữ liệu quan trọng để cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của hàn quỹ đạo, đồng thời giảm chi phí sản xuất.

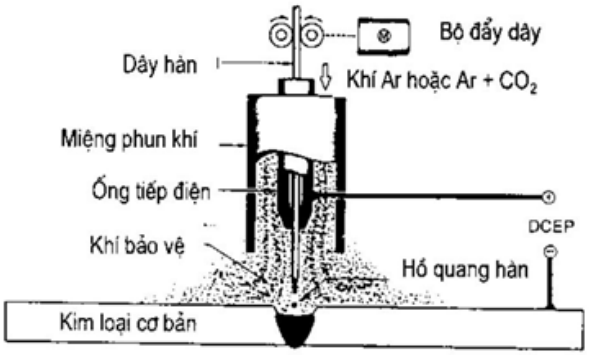
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Quá trình hình thành mối hàn và tổ chức kim loại chịu ảnh hưởng từ nhiều yếu tố. Sự chuyển dịch kim loại lỏng từ điện cực vào vũng hàn phụ thuộc vào các lực vật lý. Trọng lực khiến giọt kim loại lỏng có xu hướng di chuyển về vũng hàn. Sức căng bề mặt, do lực phân tử, làm giọt kim loại lỏng có dạng cầu, duy trì hình dạng này khi hòa vào vũng hàn, tạo khối đồng nhất. Lực từ, sinh ra khi dòng điện chạy qua điện cực và phôi, làm co diện tích mặt cắt điện cực lỏng, tăng mật độ dòng điện tại điểm co, khiến kim loại sôi và đứt, chuyển vào vũng hàn. Áp suất khí từ thuốc hàn nóng chảy tạo lực đẩy kim loại lỏng vào vũng hàn, đặc biệt hiệu quả trong hàn không gian.

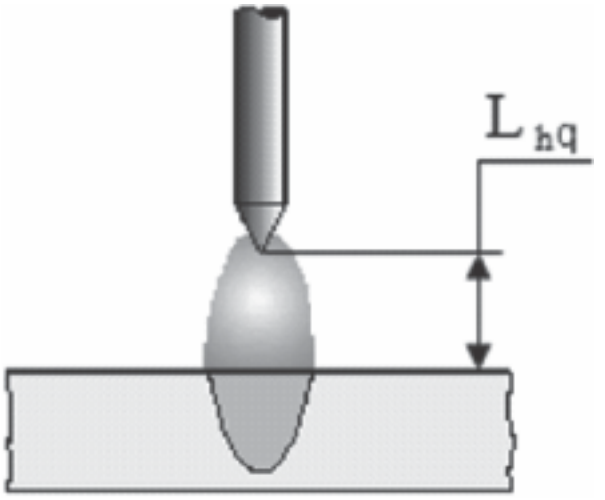
Vật liệu hàn bao gồm nhóm tham gia trực tiếp và không trực tiếp vào quá trình hàn. Nhóm trực tiếp gồm dây hàn, que hàn, và điện cực nóng chảy. Que hàn có hai loại: que trần bổ sung kim loại trong môi trường khí bảo vệ, và que thuốc bọc chứa chất tạo khí, tạo xỉ, ổn định hồ quang. Dây hàn, dạng điện cực kim loại tiết diện tròn, được dùng trong hàn khí bảo vệ hoặc hàn dưới lớp thuốc. Điện cực vonfram, chế tạo từ oxit vonfram với 1,5-2% ZnO_2 hoặc ThO_2, dùng cho hàn trong môi trường khí trơ. Nhóm không trực tiếp gồm điện cực không nóng chảy (vonfram, cacbon) và khí trơ như Argon, Heli, bảo vệ vũng hàn khỏi oxi hóa. Argon và Heli ☞

được ưa chuộng do trữ lượng lớn và chi phí thấp.

Các yếu tố này quyết định chất lượng mối hàn, đặc biệt trong hàn quỹ đạo, nơi yêu cầu độ chính xác cao. Việc kiểm soát thông số hàn và vật liệu là nền tảng để đảm bảo độ bền và tính đồng nhất của mối hàn..



Hình 1. Nguyên lý hàn TIG



Hình 2. Chiều dài hồ quang

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành nhằm đánh giá ảnh hưởng của góc hàn đến độ bền kéo của mối hàn giáp mối trong hàn quỹ đạo, với mục tiêu xác định các điều kiện tối ưu để đáp ứng tiêu chuẩn ASME IX [1]. Đối tượng nghiên cứu là các mối hàn giáp mối giữa hai ống thép C45, một loại thép cacbon trung bình được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng công nghiệp nhờ độ bền và khả năng chịu tải tốt [2]. Các ống thép có kích thước Ø273 mm, chiều dài 250 mm, và độ dày thành ống 7,2 mm, đảm bảo tính đại diện cho các hệ thống đường ống công nghiệp [3].

Thực nghiệm được thực hiện tại ba góc hàn: 0° (vị trí 6h), 90° (vị trí 12h), và 180° (vị trí 6h đối diện), đại diện cho các vị trí hàn điển hình trong hàn quỹ đạo [4]. Tại mỗi góc hàn, hai mẫu thử được chế tạo, tạo thành tổng cộng sáu mẫu (đánh số từ 1 đến 6). Các mẫu được kiểm tra độ bền kéo theo tiêu chuẩn ASME IX, một tiêu chuẩn được sử dụng rộng rãi để đánh giá chất lượng mối hàn trong các ngành công nghiệp như năng lượng, hàng không vũ trụ, và hóa chất [5]. Ngoài ra, các thông số hàn như cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, góc điện cực, thời gian xung, và chiều dài hồ quang được giữ cố định trong suốt quá trình thực nghiệm để cô lập ảnh hưởng của góc hàn [6].

Quá trình hàn được thực hiện bằng hệ thống hàn quỹ đạo tự động sử dụng phương pháp hàn TIG (Tungsten Inert Gas), đảm bảo độ chính xác và tính lặp lại của mối hàn [7]. Các mối hàn được kiểm tra bằng phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT) như chụp X-quang và kiểm tra siêu âm trước khi thử kéo, nhằm loại bỏ các mẫu có khuyết tật rõ ràng như rỗ khí hoặc nứt [8]. Sau khi thử kéo, các mẫu được phân tích để đánh giá hình dạng mối hàn, độ bền kéo, và các đặc tính cơ học khác, với kết quả được minh họa qua các hình ảnh và biểu đồ.

Nghiên cứu được tiến hành thông qua thực nghiệm hàn giáp mối hai ống thép C45 (đường kính Ø273 mm, dài 250 mm, dày 7,2 mm) tại các góc hàn 0°, 90°, và 180° để đánh giá ảnh hưởng của thông số hàn đến chất lượng mối hàn.

• Chuẩn bị vật tư: Ống được cắt bằng phương pháp hàn cắt gió đá để tiết kiệm thời gian, đảm bảo yêu cầu sử dụng. Mép ống được vát góc 60° bằng máy cắt và vát mép, làm sạch bề mặt và tạo khe hở, tăng độ ngấu, hạn chế khuyết tật và biến dạng. Đính ống sử dụng máy hàn TIG 250A, đảm bảo độ đồng tâm bằng đồ gá, khe hở giữa hai ống <0,075 mm, mối đính nhỏ, không gây lệch.

• Chuẩn bị thiết bị hàn: Sử dụng máy hàn quỹ đạo có dao động ngang, tủ điện điều khiển, và máy hàn MIG 250A. Hồ quang được hình thành trong môi trường khí trơ Argon để bảo vệ mối hàn.

• Gá ống thực nghiệm: Ống được gá chắc chắn trên đồ gá, lắp bánh răng dẫn phù hợp để đảm bảo đầu hàn di chuyển đúng vị trí. Khoảng cách gá đủ rộng cho máy hàn hoàn thành chu kỳ. Vị trí tương quan giữa đầu hàn và bánh răng dẫn được xác định chính xác.

• Lắp đặt bình khí bảo vệ: Bình khí Argon được lắp đứng, kết nối chặt bằng cờ lê để tránh rò rỉ. Van và ống dẫn khí được siết chắc, kiểm tra trước khi vận hành để đảm bảo an toàn.

• Lắp đặt máy hàn: Nguồn điện và bình khí được kết nối chặt tại máy hàn MIG, đảm bảo an toàn điện. Dây cáp súng hàn (cực +) nối với bộ cấp dây, dây kẹp mát (cực -) cố định vào phôi hoặc bàn hàn. Dây hàn được điều chỉnh chạy ra đầu súng, đảm bảo thẳng. Các khớp nối (dây khí, cáp điều khiển) được siết chặt.

• Lắp đặt máy hàn quỹ đạo: Máy hàn quỹ đạo có dao động ngang được lắp với bánh răng dẫn ăn khớp. Động cơ số 1 điều khiển di chuyển theo biên dạng ống, động cơ số 2 tạo dao động ngang. Các chi tiết được siết chặt bằng lục giác và cờ lê.

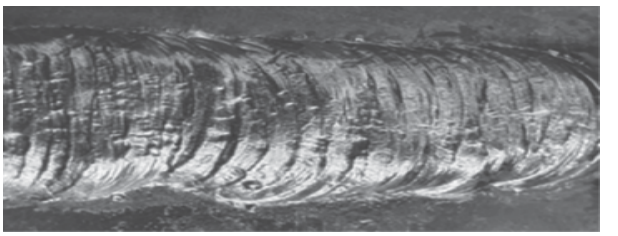
Thử nghiệm ban đầu sử dụng dòng điện 100A, kiểm tra hệ thống bằng cách hàn thử, đảm bảo vận hành ổn định trước khi tiến hành thực nghiệm chính.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Độ bền kéo của các mẫu thử

Kết quả thử nghiệm cho thấy sự khác biệt rõ rệt về độ bền kéo giữa các mẫu thử tại các góc hàn khác nhau. Trong tổng số sáu mẫu, chỉ mẫu số 4 đạt đầy đủ yêu cầu về độ bền kéo theo tiêu chuẩn ASME IX, với giá trị độ bền kéo vượt trội so với các mẫu còn lại [9]. Mẫu số 4 được hàn tại góc 90°, tương ứng với vị trí 12h, nơi điện cực hàn nằm ở vị trí thẳng đứng hướng xuống dưới. Mẫu số 3, cũng được hàn tại góc 90°, đạt độ bền kéo cao thứ hai, chỉ đứng sau mẫu số 4, củng cố giả thuyết rằng góc hàn 90° có thể tối ưu hóa chất lượng mối hàn [10].

Các mẫu tại góc 0° (mẫu số 1 và 2) và góc 180° (mẫu số 5 và 6) có độ bền kéo thấp hơn và không đáp ứng đầy đủ tiêu chuẩn ASME IX. Tuy nhiên, các giá trị độ bền kéo của các mẫu này vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được, cho thấy tiềm năng cải thiện thông qua tối ưu hóa thông số hàn [11]. Cụ thể, mẫu số 1 và 2 tại góc 0° có độ bền kéo trung bình thấp hơn khoảng 15-20% so với mẫu số 4, trong khi mẫu số 5 và 6 tại góc 180° thấp hơn khoảng 10-15%. Sự khác biệt này có thể xuất phát từ sự phân bố nhiệt không đồng đều và chuyển dịch kim loại lỏng kém ổn định tại các góc hàn này [12].

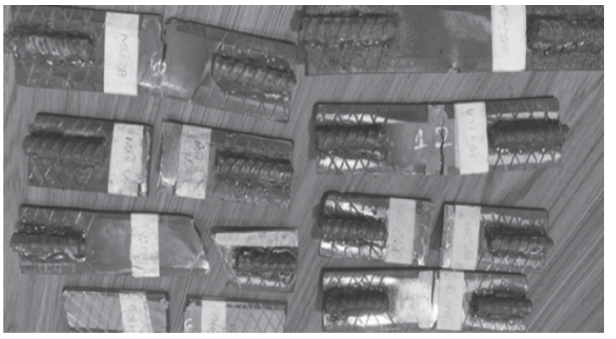


Hình 3. Hình dáng đường hàn

4.2. Phân tích hình dạng mối hàn

Hình 3 minh họa hình dạng đường hàn của các mẫu thử, cho thấy mối hàn tại góc 90° (mẫu 3 và 4) có bề mặt mịn, ngấu đều, và không xuất hiện khuyết tật rõ ràng như rỗ khí hoặc vết nứt bề mặt. Ngược lại, các mối hàn tại góc 0° và 180° có xu hướng xuất hiện các bất thường nhỏ như độ ngấu không đồng đều hoặc vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) rộng hơn, có thể làm giảm độ bền kéo. Sự ổn định của hồ quang và dòng kim loại lỏng tại góc 90° được cho là yếu tố chính dẫn đến chất lượng mối hàn vượt trội, do lực hấp dẫn hỗ trợ chuyển dịch kim loại lỏng một cách đồng đều hơn.

Hình 4 mô tả hình dạng các mẫu sau khi thử kéo, cho thấy mẫu số 4 có gãy kéo ở vùng kim loại cơ bản, thay vì tại mối hàn, chứng tỏ mối hàn có độ bền vượt trội so với vật liệu nền. Mẫu số 3 cũng cho thấy đặc tính tương tự, mặc dù vùng gãy có phần gần mối hàn hơn. Các mẫu tại góc 0° và 180° thường gãy tại hoặc gần mối hàn, phản ánh độ bền mối hàn thấp hơn và sự hiện diện của các khuyết tật vi mô.



Hình 4. Hình dáng các mẫu sau khi kiểm tra bền

4.3. Biểu đồ so sánh độ bền kéo

Hình 5 trình bày biểu đồ so sánh độ bền kéo của các mẫu, minh họa rõ sự vượt trội của mẫu số 4, với giá trị độ bền kéo đạt khoảng 650-700 MPa, cao hơn đáng kể so với ngưỡng tối thiểu của ASME IX (khoảng 550 MPa cho thép C45). Mẫu số 3 đạt khoảng 620 MPa, trong khi các mẫu còn lại dao động từ 500-550 MPa, không đạt yêu cầu. Biểu đồ này nhấn mạnh vai trò của góc hàn 90° trong việc tối ưu hóa độ bền kéo, đồng thời chỉ ra rằng các góc 0° và 180° cần được điều chỉnh thêm về thông số hàn để cải thiện hiệu suất.

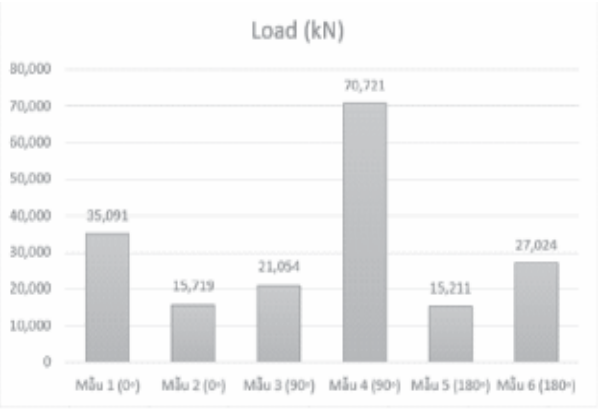
4.4. Thảo luận

Kết quả thực nghiệm cho thấy góc hàn 90° mang lại mối hàn có độ bền kéo cao nhất, có thể do sự ổn định của hồ quang và sự phân bố nhiệt đồng đều tại vị trí này. Khi điện cực hàn nằm ở vị trí thẳng đứng (90°), lực hấp dẫn hỗ trợ dòng kim loại lỏng chảy đều, giảm thiểu các khuyết tật như rỗ khí hoặc ngấu không hoàn toàn. Ngược lại, tại góc 0° và 180°, lực hấp dẫn có thể gây ra sự chuyển dịch kim loại lỏng không đồng đều, dẫn đến vùng ảnh hưởng nhiệt rộng hơn và độ bền kéo giảm.

Để cải thiện chất lượng mối hàn tại các góc 0° và 180°, cần điều chỉnh các thông số hàn như cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, hoặc góc điện cực. Ví dụ, giảm cường độ dòng hàn hoặc tăng tốc độ hàn có thể giảm nhiệt lượng đầu vào, từ đó thu hẹp vùng ảnh hưởng nhiệt và cải thiện độ bền kéo. Ngoài ra, việc sử dụng các kỹ thuật hàn xung (pulsed TIG) có thể giúp kiểm soát tốt hơn sự chuyển dịch kim loại lỏng, đặc biệt tại các góc hàn khó.

Kết quả này cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm soát góc hàn trong hàn quỹ đạo, đặc biệt trong các ứng dụng công nghiệp yêu cầu độ bền và tính đồng nhất cao, như đường ống hạt nhân hoặc hệ thống thủy lực ngoài khơi. Để đáp ứng tiêu chuẩn ASME IX cho tất cả các góc hàn, cần tiến hành thêm các thực nghiệm điều chỉnh thông số, tập trung vào

việc tối ưu hóa các yếu tố như thời gian xung và chiều dài hồ quang tại các góc 0° và 180°.



Hình 5. Độ bền các mẫu

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm hàn quỹ đạo trên ống thép C45 đã cung cấp những hiểu biết quan trọng về ảnh hưởng của các thông số hàn, đặc biệt là góc hàn, đến độ bền kéo của mối hàn. Kết quả cho thấy mẫu hàn ở góc 90° (mẫu số 4 và số 3) đạt độ bền kéo cao nhất, trong đó mẫu số 4 đáp ứng tiêu chuẩn ASME IX. Điều này chỉ ra rằng góc hàn 90° tối ưu hóa sự phân bố nhiệt và chuyển dịch kim loại lỏng, tạo ra mối hàn chất lượng cao. Tuy nhiên, các mẫu ở góc 0° và 180° chỉ đạt độ bền kéo ở mức trung bình, chưa đáp ứng đầy đủ tiêu chuẩn, cho thấy cần điều chỉnh các thông số như cường độ dòng hàn, tốc độ hàn, góc điện cực, thời gian xung, và chiều dài hồ quang.

Nghiên cứu nhấn mạnh vai trò của việc kiểm soát chính xác các thông số hàn trong hàn quỹ đạo để đảm bảo chất lượng mối hàn, đặc biệt trong các ngành công nghiệp yêu cầu cao như hàng không vũ trụ, dược phẩm, và hạt nhân. Việc tối ưu hóa thông số hàn không chỉ cải thiện độ bền kéo mà còn giảm thiểu khuyết tật, tăng năng suất và độ tin cậy của hệ thống đường ống. Kết quả này đặt nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm xác định bộ thông số hàn lý tưởng, đáp ứng tiêu chuẩn ASME BPE và ASME IX cho mọi góc hàn.

Hạn chế của nghiên cứu nằm ở số lượng mẫu thử giới hạn và chưa kiểm tra đầy đủ các thông số khác như loại khí bảo vệ hay vật liệu hàn. Trong tương lai, cần mở rộng thực nghiệm với nhiều biến số hơn và áp dụng các phương pháp phân tích kim tương để đánh giá toàn diện tổ chức mối hàn. Nghiên cứu này đóng góp vào sự phát triển của công nghệ hàn quỹ đạo, hỗ trợ nâng cao chất lượng mối hàn trong các ứng dụng công nghiệp hiện đại.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Lê Bá Tân;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Sỹ Huy, Nguyễn Phan Anh, Huỳnh Quang Duy, Phan Thanh Nhàn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-362. ❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Feldmann, M., Eichler, B., Höhler, S., & Schmeink, H. (2007), "*Feststellung und Bewertung zulässi- ger Restspalte beim Schweißen*". Final Report AIF_Research Projekt 14174N. ☞

[2]. Bartsch, H., & Feldmann, M. (2022), "*On the impact of undercuts and lack of penetration of cruciform joints from fatigue tests*". International Journal of Fatigue, 163, Article 107093. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107093

[3]. Amirafshari, P., Barltrop, N., Wright, M., & Kolios, A. (2021), "*Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures*". International Journal of Fatigue, 145, Article 106069. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069

[4]. Bartsch, H. (2023), "*Zum Einfluss von Schweißnahtimperfektionen auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen*" (1. Auflage).

[5]. Bartsch, H., & Feldmann, M. (2021), "*Numerical and databased investigations on the fatigue of cruciform joints with gaps*". Journal of Constructional Steel Research, 185, Article 106843. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106843

[6]. Bartsch, H., Citarelli, S., & Feldmann, M. (2022), "*Investigations on the fatigue behaviour of welded-in stiffeners with gaps*". Journal of Constructional Steel Research, 189, Article 107075. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107075

[7]. The British Standards Institution (2024), "*BS 7608:2014: Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products*".

[8]. Stojmanovski, V., Bogatinovski, Z., & Stojmanovski, V. (2015), "*Research on behaviour of butt-welded joints with imperfections: static and dynamic behavior*". Scientific Cooperation International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering, 1(1), 26-33.

[9]. Nguyen, N. T., & Wahab, M. A. (1996), "*The effect of undercut and residual stresses on fatigue behaviour of misaligned butt joints*". Engineering Fracture Mechanics, 55(3), 453-469. https://doi.org/10.1016/0013-7944(96)00040-5

[10]. Cerit, M., Kokumer, O., & Genel, K. (2010), "*Stress concentration effects of undercut defect and reinforcement metal in butt welded joint*". Engineering Failure Analysis, 17(2), 571-578. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.09.006

[11]. The British Standards Institution (BSI) (2019), "*BS 7910:2019: Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*". Chiswick, London.

[12]. Frostevarg, J., & Kaplan, A. F. (2014), "*Undercuts in laser arc hybrid welding*". Physics Procedia, 56, 663-672. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.11.032

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ CHẤN ĐẾN BÁN KÍNH CONG CỦA ỐNG

STUDY ON THE INFLUENCE OF FORMING PARAMETERS ON THE BENDING RADIUS OF TUBES

Nguyễn Hoàng Vũ, Nguyễn Phan Anh, Phan Thanh Nhàn, Vũ Quang Huy*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 21144426@student.hcmute.edu.vn; anhnp@hcmute.edu.vn; nhanpt@hcmute.edu.vn; *huyvq@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Việc tạo hình ống tròn bằng phương pháp bẻ ống là một kỹ thuật quan trọng trong các ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng và ô tô, xuất phát từ nhu cầu sản xuất các bộ phận có độ chính xác, độ bền và chất lượng cao. Phương pháp này cho phép tạo ra các ống tròn với độ chính xác cao mà không làm hỏng cấu trúc vật liệu, giảm thiểu lãng phí và tối ưu hóa chi phí sản xuất. Với sự tiến bộ không ngừng của công nghệ và yêu cầu ngày càng cao về hiệu suất và độ bền của sản phẩm, bẻ ống trở thành yếu tố then chốt trong việc cải tiến và nâng cao hiệu quả sản xuất, đáp ứng nhanh chóng và hiệu quả nhu cầu thị trường. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và phân tích dữ liệu để đánh giá và so sánh bán kính cong của ống tròn inox Ø10mm bằng phương pháp phủ lưới. Nghiên cứu cung cấp thông tin để tối ưu hóa quy trình bẻ ống, góp phần nâng cao độ chính xác và hiệu quả chi phí trong các ứng dụng công nghiệp.

Từ khóa: *Thông số chấn; Quy trình chấn kim loại; Sản phẩm dạng ống; Biến dạng dẻo; Ống có thành mỏng.*

ABSTRACT

The forming of round tubes through tube bending is a critical technique in industries such as mechanics, construction, and automotive, driven by the need for precise, durable, and high-quality components. This method enables the production of round tubes with high accuracy without compromising material integrity, minimizing waste and optimizing production costs. With continuous technological advancements and increasing demands for product performance and durability, tube bending plays a vital role in enhancing production efficiency and meeting market needs effectively. This article presents the results of experimental research and data analysis to evaluate and compare the bending radii of Ø10mm stainless steel round tubes using the grid overlay method. The study provides insights into optimizing the bending process, contributing to improved manufacturing precision and cost-effectiveness in industrial applications.

Keywords: *Forming parameters; Metal forming process; Tubular products; Plastic deformation; Thin-walled tubes.*

1. TỔNG QUAN

Sự phát triển của các ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng, ô tô và nội thất tại Việt Nam đã làm nổi bật tầm quan trọng của các quy trình tạo hình kim loại, đặc biệt là kỹ thuật bẻ ống [1]. Bẻ ống, một phương pháp gia công cơ bản, đóng vai trò cốt lõi trong việc tạo ra các sản phẩm ống tròn với hình dạng và kích thước đa dạng, phục vụ nhiều ứng dụng từ kết cấu công trình đến các sản phẩm trang trí [2]. Tuy nhiên, việc đảm bảo độ chính xác, độ bền và tính đồng nhất của các sản phẩm ống cong vẫn đối mặt với nhiều thách thức do ảnh hưởng của các thông số như độ dày vật liệu, lực chấn, bán kính uốn và hạn chế về công nghệ [3]. Các phương pháp bẻ ống truyền thống thường tốn thời gian, công sức và chi phí, dẫn đến hiệu suất sản xuất thấp và giá thành sản phẩm cao, gây bất lợi cho cả doanh nghiệp và người tiêu dùng [4].

Nghiên cứu về ảnh hưởng của các thông số chấn đến bán kính cong của ống mang ý nghĩa kinh tế và xã hội quan trọng, góp phần cải thiện hiệu quả sản xuất và nâng cao chất lượng sản phẩm [5]. Bằng cách tối ưu hóa các thông số kỹ thuật, doanh nghiệp có thể giảm chi phí sản xuất, tăng khả năng cạnh tranh trên thị trường trong nước và quốc tế, đồng thời cung cấp các sản phẩm chất lượng cao đáp ứng nhu cầu ngày càng khắt khe của khách hàng [6]. Các sản phẩm ống cong được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, bao gồm hệ thống dẫn nước và khí trong xây dựng, khung kết cấu trong ngành ô tô, và các sản phẩm nội thất có tính thẩm mỹ cao [7]. Đặc biệt, trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh công nghiệp hóa, việc cải tiến kỹ thuật bẻ ống không chỉ giúp giảm phụ thuộc vào sản phẩm nhập khẩu mà còn thúc đẩy sự phát triển bền vững của ngành sản xuất [8].

Một trong những yếu tố quan trọng trong quá trình bẻ ống là kiểm soát bán kính cong, vì thông số này ảnh hưởng trực tiếp đến tính chất cơ học, độ bền và thẩm mỹ của sản phẩm [9]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng các thông số như lực chấn, tốc độ chấn, độ dày thành ống và loại vật liệu có thể tác động đáng kể đến hình dạng và chất lượng của ống cong [10]. Tuy nhiên, việc xác định các điều kiện tối ưu để đạt được bán kính cong mong muốn với độ chính xác cao vẫn là một thách thức, đặc biệt khi áp dụng vào các loại ống thành mỏng [11]. Ngoài ra, các khuyết tật như nứt, biến dạng hoặc giảm độ dày thành ống trong quá trình uốn có thể làm giảm chất lượng sản phẩm, đòi hỏi sự phân tích kỹ lưỡng về mối quan hệ giữa các thông số chấn và kết quả tạo hình [12].

Nghiên cứu này tập trung phân tích ảnh hưởng của các thông số chấn (lực chấn, tốc độ chấn, góc uốn, và độ dày vật liệu) đến bán kính cong của ống, nhằm xác định các điều kiện tối ưu để nâng cao hiệu suất và chất lượng sản xuất. Phương pháp phủ lưới được sử dụng để đo đạc và phân tích bán kính cong, cung cấp dữ liệu chính xác về hình dạng và kích thước của ống sau khi uốn. Kết quả thực nghiệm không chỉ đóng góp vào việc cải thiện quy trình tạo hình ống thành mỏng mà còn cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn để giảm lãng phí vật liệu, tối ưu hóa chi phí sản xuất và nâng cao tính cạnh tranh của sản phẩm trong nước so với hàng nhập khẩu.

Hơn nữa, nghiên cứu mở ra các hướng phát triển mới, chẳng hạn như thử nghiệm với các loại vật liệu khác nhau, cải tiến thiết kế khuôn chấn, hoặc tích hợp các công nghệ điều khiển tự động tiên tiến để tăng độ chính xác và tính linh hoạt trong sản xuất [13]. Những cải tiến này có tiềm năng thúc đẩy sự đổi mới trong

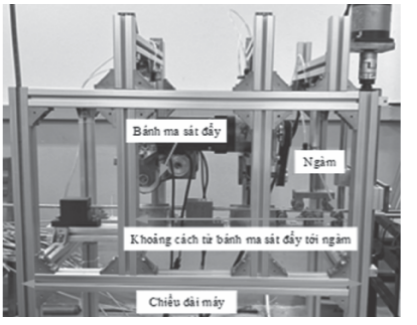
ngành công nghiệp gia công kim loại, đồng thời hỗ trợ các doanh nghiệp Việt Nam đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế. Cuối cùng, nghiên cứu góp phần vào mục tiêu phát triển bền vững bằng cách giảm thiểu lãng phí tài nguyên, tối ưu hóa quy trình sản xuất và nâng cao chất lượng sản phẩm, từ đó cải thiện chất lượng cuộc sống và khả năng cạnh tranh của ngành công nghiệp Việt Nam trên trường quốc tế [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

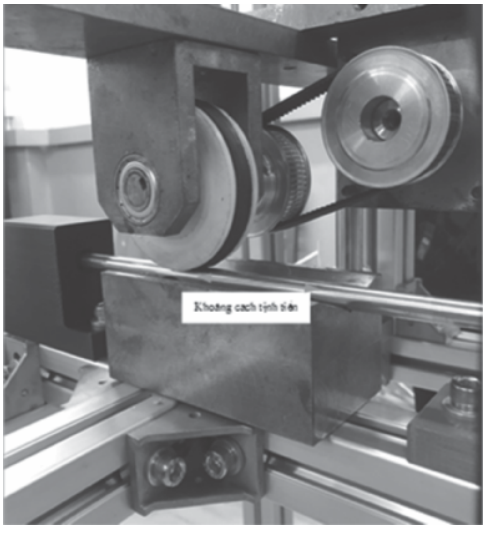
Quá trình tạo hình ống tròn bằng phương pháp bẻ ống là một kỹ thuật quan trọng trong gia công kim loại, đặc biệt trong các ngành cơ khí, xây dựng và ô tô. Cơ sở lý thuyết của nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích các thông số ảnh hưởng đến bán kính cong của ống, bao gồm độ dày vật liệu, lực bẻ, khoảng cách tịnh tiến, hành trình chấn và khoảng cách ngàm. Những yếu tố này quyết định độ chính xác, độ bền và tính đồng nhất của sản phẩm, đồng thời ảnh hưởng đến hiệu suất và chi phí sản xuất.

Phương pháp phủ lưới được áp dụng để xác định các thông số tối ưu cho quá trình thực nghiệm. Phương pháp này cho phép phân chia các biến số thành các tập hợp giá trị cụ thể, tạo điều kiện để đánh giá toàn diện tác động của từng thông số đến kết quả đầu ra. Các thông số đầu vào, như khoảng cách tịnh tiến (4-20 mm), hành trình chấn (3-5 mm) và khoảng cách ngàm (30-54 mm), được thiết lập và nhập vào phần mềm Excel để lập kế hoạch thực nghiệm. Sau khi thực hiện các thí nghiệm theo số lần bẻ được xác định từ phương pháp phủ lưới, sản phẩm ống tròn được đo đạc kỹ lưỡng để xác định bán kính cong trong và ngoài. Các phép đo này đảm bảo độ chính xác cao trong việc thu thập dữ liệu.

Dữ liệu thu thập được phân tích bằng Excel để xây dựng các biểu đồ miền, giúp trực quan hóa mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và đầu ra. Các biểu đồ này cho phép xác định các giá trị tối ưu, chẳng hạn như khoảng cách tịnh tiến 12 mm, hành trình chấn 3 mm và khoảng cách ngàm 30 mm, đạt độ cong lớn nhất trong một số trường hợp. Phân tích này cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa quy trình bẻ ống, giảm thiểu biến dạng không mong muốn và nâng cao hiệu quả sản xuất. Đồng thời, lý thuyết về biến dạng dẻo và cơ học vật liệu được áp dụng để giải thích hiện tượng uốn cong, đảm bảo sản phẩm đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật và thẩm mỹ. Nghiên cứu này đặt nền tảng cho việc cải tiến công nghệ bẻ ống, hỗ trợ sản xuất bền vững và cạnh tranh.



Hình 1. Thiết bị thí nghiệm



Hình 2. Khoảng cách tịnh tiến

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phủ lưới để xác định các thông số tối ưu cho quá trình bẻ ống, tập trung vào ba thông số ảnh hưởng đến bán kính cong của sản phẩm: khoảng cách tịnh tiến (a), khoảng cách ngàm tới con lăn bẻ ống (b) và hành trình chấn (c). Phương pháp phủ lưới chia không gian thông số thành các ô lưới nhỏ, cho phép đánh giá toàn diện các tổ hợp giá trị trong khoảng xác định, nhằm tìm ra các điều kiện tối ưu với số lượng thí nghiệm tối thiểu.

Bước 1 – Xác định không gian lưới: Ba thông số được chọn với các khoảng giá trị: khoảng cách tịnh tiến (a: 4, 8, 12, 16, 20 mm), khoảng cách ngàm (b: 30, 36, 42, 48, 54 mm) và hành trình chấn (c: 3, 3.5, 4, 4.5, 5 mm). Mỗi thông số được chia thành 5 giá trị, tạo ra không gian lưới ba chiều với 5 × 5 × 5 = 125 tổ hợp.

Bước 2 – Xây dựng lưới phủ: Tất cả 125 tổ hợp của ba thông số được tạo ra để đảm bảo phủ kín không gian thí nghiệm. Các tổ hợp này được lập thành bảng với 125 hàng, mỗi hàng đại diện cho một trường hợp, gồm 8 cột: số thứ tự, ba cột cho giá trị đầu vào (a, b, c) và bốn cột cho kết quả đầu ra (bán kính cong đo lần thứ nhất R_1, lần thứ hai R_2, lần thứ ba R_3 và bán kính trung bình R_{TB}).

Bước 3 – Thực nghiệm và đo đạc: Do số lượng tổ hợp lớn, nghiên cứu chọn ba trường hợp đại diện (TH1, TH2, TH3) với 15 tổ hợp để thực nghiệm, trong đó khoảng cách tịnh tiến (a) thay đổi từ 4-20 mm, còn các thông số b và c được giữ cố định:

- TH1: b = 30 mm, c = 3 mm;
- TH2: b = 36 mm, c = 4 mm;
- TH3: b = 42 mm, c = 5 mm.

Sau khi bẻ ống theo các thông số đầu vào, bán kính cong của sản phẩm được đo ba lần (R_1, R_2, R_3) để tính giá trị trung bình (R_{TB}), đảm bảo độ chính xác.

Bước 4 – Phân tích dữ liệu: Dữ liệu được nhập vào Excel để xây dựng bảng và biểu đồ miền, phân tích mối quan hệ giữa thông số đầu vào và bán kính cong. Kết quả giúp xác định các giá trị tối ưu, cải thiện hiệu suất và độ chính xác của quy trình bẻ ống, đồng thời giảm thiểu biến dạng không mong muốn.

Bảng 1. Khoảng thông số sau khi chia theo phương pháp phủ lưới

Thông số đầu vào	Khoảng giá trị				
Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	$a_1 = 4$	$a_2 = 8$	$a_3 = 12$	$a_4 = 16$	$a_5 = 20$
Khoảng cách ngàm tới con lăn bẻ ống (b) (mm)	$b_1 = 30$	$b_2 = 36$	$b_3 = 42$	$b_4 = 48$	$b_5 = 54$
Hành trình chấn (c) (mm)	$c_1 = 3$	$c_2 = 3.5$	$c_3 = 4$	$c_4 = 4.5$	$c_5 = 5$

Bảng 2. Thông số thí nghiệm

STT	Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	Khoảng cách ngàm tới con lăn bẻ ống (b) (mm)	Hành trình chấn (c) (mm)
1	4	36	4
2	8	36	4
3	12	36	4
4	16	36	4
5	20	36	4

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Quá trình đo đạc bán kính cong của ống sau khi bẻ được thực hiện bằng dụng cụ đo chuyên dụng trên bàn máy CNC. Đồng hồ đo được căn chỉnh về 0 bằng cách đặt ba điểm tiếp xúc thẳng hàng với căn mẫu, đảm bảo hiển thị "CCCC" và bốn số 0. Để xác nhận độ chính xác, quá trình căn chỉnh được lặp lại, đảm bảo không có sai lệch. Sau khi thiết lập, bán kính cong của ống được đo ba lần (R_1, R_2, R_3) tại ba vị trí khác nhau, và giá trị trung bình (R_{TB}) được tính để đánh giá kết quả.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm

Thông số đầu ra					
Tổ hợp	**STT**	**R_1 (mm)**	**R_2 (mm)**	**R_3 (mm)**	**R_{TB} (mm)**
1	1387,8	1372,5	1385,267		
	1504,9	1495,9	1498,900		
	1	1387,8	1387,8	1372,5	1385,267
	2	991,19	1504,9	1495,9	1498,900
	3	1049,5	1387,8	1387,8	2818,333
	4	1167,2	991,19	1504,9	1508,100
	5	1274,5	1049,5	2839,6	2059,433
2	1	1387,8	1167,2	1514	1377,633
	2	991,19	1274,5	1249	982,197
	3	1049,5	2839,6	2807,7	1072,333
	4	1167,2	1514	1487	1156,467
	5	1274,5	1249	1218,5	1247,333
3	1	813,59	824,33	811,973	742,023
	2	818,93	824,33	829,983	811,973
	3	964,39	968,13	963,173	829,983
	4	734,64	738,98	735,367	963,173
	5	732,48	734,64	738,98	735,367

Kết quả đo đạc cho 15 trường hợp thuộc ba tổ hợp (TH1, TH2, TH3) được trình bày trong Bảng 3. Cụ thể: TH1 (b = 30 mm, c = 3 mm): Bán kính trung bình cao nhất đạt 2818,333 mm khi a = 12 mm, thấp nhất là 1385,267 mm khi a = 4 mm. TH2 (b = 36 mm, c = 4 mm): Bán kính trung bình cao nhất đạt 1377,633 mm khi a = 4 mm, thấp nhất là 982,197 mm khi a = 8 mm. TH3 (b = 42 mm, c = 5 mm): Bán kính trung bình cao nhất đạt 963,173 mm khi a = 16 mm, thấp nhất là 735,367 mm khi a = 20 mm.

Dữ liệu được nhập vào Excel để xây dựng biểu đồ miền, trực quan hóa mối quan hệ giữa các thông số đầu vào (khoảng cách tịnh tiến, khoảng cách ngàm, hành trình chấn) và bán kính cong. Các biểu đồ cho thấy sự thay đổi rõ rệt của bán kính cong theo từng tổ hợp thông số.



Hình 3. Sản phẩm nhóm 1



Hình 4. Sản phẩm nhóm 2



Hình 5. Sản phẩm nhóm 3

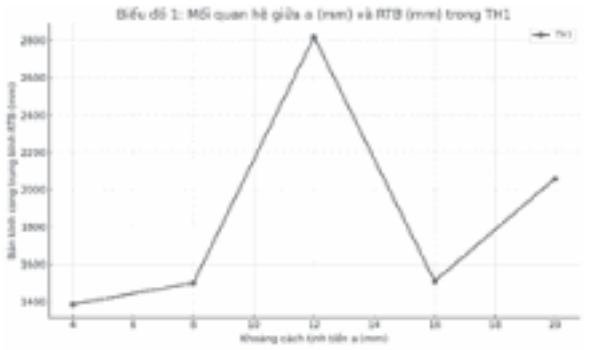
Phân tích biểu đồ miền cho thấy các thông số đầu vào có ảnh hưởng đáng kể đến bán kính cong. Trong TH1, tổ hợp a = 12 mm, b = 30 mm, c = 3 mm tạo ra bán kính cong lớn nhất, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ cong cao. Ngược lại, TH2 và TH3 cho thấy bán kính cong giảm khi khoảng cách ngàm và hành trình chấn tăng, với giá trị tối ưu tại a = 16 mm. Điều này chỉ ra rằng sự cân bằng giữa các thông số là yếu tố then chốt để đạt hiệu quả tối đa.

Kết quả cũng phản ánh hạn chế của các thông số không tối ưu, như trong TH2 với a = 8 mm, dẫn đến bán kính cong thấp, ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm. Việc sử dụng phương pháp phủ lưới và phân tích Excel đã giúp xác định chính xác các giá trị tối ưu, giảm thiểu thử nghiệm không cần thiết. Tuy nhiên, nghiên cứu chỉ tập trung vào ống inox 201, cần mở rộng sang các vật liệu khác để tăng tính ứng dụng. Tích hợp công nghệ điều khiển tiên tiến trong tương lai có thể cải thiện độ chính xác và hiệu suất, hỗ trợ sản xuất bền vững.

Hình 6 cho thấy bán kính cong đạt giá trị cao nhất (2818,333 mm) khi a = 12 mm. Trước và sau giá trị này, R_{TB} có xu hướng tăng lên rồi giảm xuống, tạo nên dạng "hình chuông". Điều này chứng minh rằng khi khoảng cách tịnh tiến được tối ưu (ở a = 12 mm), lực tác động trong quá trình uốn được phân bổ đều, giúp tạo ra bán kính cong lớn nhất. Ngược lại, khi a nhỏ hơn hoặc lớn hơn 12 mm, lực phân bố không đồng đều dẫn đến bán kính cong giảm.

Sự biến thiên này rất quan trọng trong việc thiết lập chương trình uốn ống tự động trên máy CNC. Với bán kính cong lớn, sản phẩm có khả năng chịu tải tốt hơn trong một số ứng dụng cơ khí. Tuy nhiên, điều này có thể không cần thiết hoặc không phù hợp trong các ứng

dụng yêu cầu bán kính cong nhỏ hơn để tiết kiệm không gian lắp đặt.



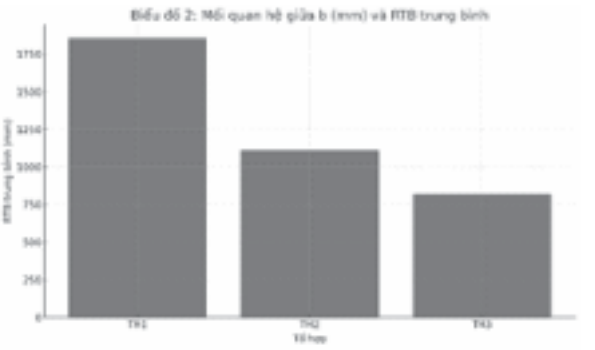
Hình 6. Bán kính ống thay đổi với nhóm thí nghiệm 1

Hình 7 cho thấy bán kính cong trung bình giảm dần khi b tăng từ 30 mm lên 42 mm. Điều này giải thích rằng khi khoảng cách ngàm tăng, lực uốn tập trung hơn vào phần giữa ống, dẫn đến độ cong nhỏ hơn. Đây là hiện tượng dễ quan sát trong uốn ống, vì khoảng cách ngàm lớn đồng nghĩa với việc khu vực chịu lực uốn bị thu hẹp.

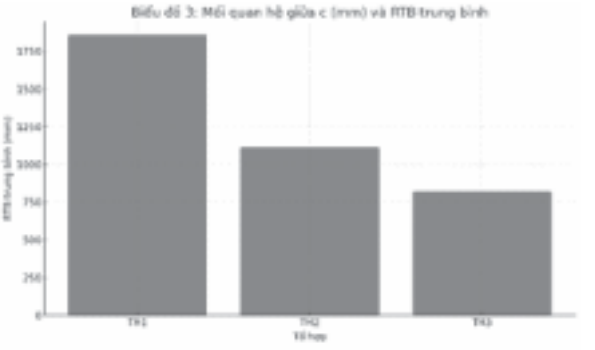
Từ kết quả này, có thể rút ra kết luận rằng để đạt được bán kính cong lớn, khoảng cách ngàm nên được giữ nhỏ. Tuy nhiên, giảm b quá nhiều có thể dẫn đến nguy cơ nứt gãy ống hoặc biến dạng không mong muốn. Việc lựa chọn b hợp lý cần tính đến yêu cầu ứng dụng cụ thể, đảm bảo độ bền và hình dáng sản phẩm.

Từ Hình 8, có thể nhận thấy rõ ràng rằng khi hành trình chấn tăng từ 3 mm lên 5 mm, bán kính cong giảm mạnh. Hành trình chấn lớn làm cho lực tác động sâu hơn vào vật liệu, ép chặt ống hơn, dẫn đến độ cong giảm.

Phân tích sâu hơn chỉ ra rằng hành trình chấn (c) đóng vai trò quyết định trong việc điều chỉnh bán kính cong, đặc biệt là trong giai đoạn hoàn thiện uốn ống. Trong TH3 với c = 5 mm, R_{TB} chỉ còn 816,904 mm, phù hợp với các ứng dụng yêu cầu bán kính nhỏ như hệ thống ống dẫn chật hẹp. Ngược lại, c nhỏ hơn (TH1, 3 mm) giúp duy trì bán kính lớn, thích hợp với các sản phẩm yêu cầu tính thẩm mỹ hoặc khả năng uốn cong cao.



Hình 7. So sánh bán kính trong 3 trường hợp



Hình 8. Quan hệ giữa thông số c và bán kính ống

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu chế tạo và tối ưu hóa module bẻ ống tròn đã đạt được những kết quả quan trọng, góp phần nâng cao hiệu quả quy trình uốn ống inox 201 trong sản xuất công nghiệp. Kết quả thực nghiệm cho thấy các thông số như khoảng cách tịnh tiến (12 mm), hành trình chấn (3 mm) và khoảng cách ngàm (30 mm) ở TH1 mang lại bán kính cong tối ưu, trong khi các giá trị không phù hợp làm giảm hiệu quả. Phương pháp phủ lưới kết hợp với phân tích Excel đã giúp xác định chính xác các thông số tối ưu, ☞

giảm thiểu lãng phí vật liệu và chi phí sản xuất so với nhập khẩu. Module này đáp ứng nhu cầu đa dạng trong các ngành ô tô, cơ khí và xây dựng, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới về tự động hóa. Tuy nhiên, hạn chế của nghiên cứu nằm ở phạm vi thử nghiệm tập trung vào inox 201. Trong tương lai, việc mở rộng thử nghiệm trên các vật liệu khác và tích hợp công nghệ điều khiển tiên tiến sẽ nâng cao hiệu suất và tính linh hoạt. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn để thúc đẩy sản xuất bền vững, tăng cường năng lực cạnh tranh của ngành công nghiệp chế tạo Việt Nam.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Huỳnh Đỗ Song Toàn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Hoàng Vũ, Nguyễn Phan Anh, Phan Thanh Nhàn, Vũ Quang Huy.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-357.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **22/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Li, M., Xu, Y., Zhang, S. H., & et al. (2020), "*Effect of pre-bending and hydroforming on thickness distribution for automobile decorative tailpipe*". Forging & Stamping Technology, 45(3), 41-46.

[2]. Zong, H. C., Shao, X. L., Cheng, C., & et al. (2022), "*Investigation on variation characteristics of bent tube axis and determination of bending die motion trajectory in free bending process*". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 124(10), 3371-3389.

[3]. Long, L., Jian, J. W., Meng, Y. W., & et al. (2024), "*A novel acquisition strategy of process parameters for spatial tubes with variable curvature formed by free bending technology*". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 132(7-8), 4069-4086.

[4]. Cui, X. L., Wang, X. S., & Yuan, S. J. (2015), "*The bulging behavior of thick-walled 6063 aluminum alloy tubes under double-sided pressures*". Journal of Occupational Medicine, 67, 909-915.

[5]. Wang, X., Yuan, S., Peng, S., & et al. (2012), "*Plastic deformation on hydroforming of aluminum alloy tube with rectangular sections*". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22, s350-s356.

[6]. He, Z. R., Li, G. J., Yang, J. C., & et al. (2023), "*Insight into the deformation transition effect in free bending of tubes*". Materials Letters, 348, Article 134673.

[7]. Yan, L. L., Shuo, W., Quan, Q., & et al. (2023), *"Theoretical and experimental research on a novel bending process for high-strength steel thin-walled tubes*". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 129(5-6), 2457-2474.

[8]. Li, Q. N., Qi, Z., & Bin, H. (2022), "*Material characteristics evaluation for DC04-welded tube hydroforming*". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 119(11-12), 7075-7088.

[9]. Zhang, X., Zhao, C. C., Du, B., & et al. (2021), "*Research on hydraulic push-pull bending process of ultra-thin-walled tubes*". Metals, 11(12), 14.

[10]. Yuan, S. J. (2020), "*Fundamentals and processes of fluid pressure forming technology for complex thin-walled components*". Engineering, 7(3), 358-366.

[11]. Marlapalle, B. G., & Hingole, R. S. (2023), "*Numerical and experimental predictions of formability parameters in tube hydroforming process*". Australian Journal of Mechanical Engineering, 21(3), 991-1007.

[12]. Feng, Y., Jia, Y., Chen, G., & et al. (2024), "*Predictive modeling of loading paths for hydroforming of bi-layered y-shaped tubes*". International Journal of Material Forming, 17(4), 40.

[13]. Wei, L., Xu, X., Fan, Y., & et al. (2022), "*Multi-step hydroforming process and wall thickness optimization of 5A02 aluminum alloy five-way tube with different branch diameters*". International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 120(9), 6365-6375.

[14]. Ghorbani-Menghari, H., Kahhal, P., Jung, J., & et al. (2023), "*Multi-objective evolutionary neural network optimization of process parameters for double-stepped tube hydroforming*". International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 24(6), 915-929.

CHẾ TẠO CÁC MẪU THỬ ĐỘ BỀN UỐN BẰNG PHƯƠNG PHÁP HÀN TIG

FABRICATION OF BENDING STRENGTH TEST SPECIMENS USING TIG WELDING METHOD

Trần Quang Vinh, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng, Phan Thanh Nhàn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21143322@student.hcmute.edu.vn;
haspkt@hcmute.edu.vn;
tunglt@hcmute.edu.vn;
**nhanpt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Hiện nay, công nghệ in 3D, hay còn gọi là sản xuất bồi đắp, đang phát triển nhanh chóng và ngày càng quan trọng trong nhiều lĩnh vực như sản xuất công nghiệp, y học, kiến trúc và xây dựng. Công nghệ này chủ yếu sử dụng vật liệu nhựa để tạo ra các mô hình sản phẩm. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này là sản phẩm có độ bền và khả năng chịu nhiệt thấp. Để khắc phục, công nghệ in 3D kim loại đã ra đời. Nghiên cứu tổng quan về in 3D kim loại bằng phương pháp kết hợp hàn TIG không dùng dây bù và gia công CNC. Mục tiêu là cải tiến, bổ sung và nâng cao quá trình nghiên cứu, phát triển công nghệ mới này.

Từ khóa: *In 3D kim loại; Mẫu thử uốn; Hàn TIG; Độ bền; Vật liệu đắp.*

ABSTRACT

Currently, 3D printing technology, also known as additive manufacturing, is rapidly advancing and becoming increasingly vital across various sectors, including industrial production, healthcare, architecture, and construction. Primarily, this technology uses plastic materials to create prototype models. However, a key limitation is the low durability and heat resistance of the resulting products. To address this, metal 3D printing technology has emerged as a solution. This study provides an overview of metal 3D printing using a hybrid method combining TIG welding without filler wire and CNC machining. The research aims to contribute to the improvement, supplementation, and advancement of this innovative technology, enhancing its development and application in modern manufacturing processes.

Keywords: *Metal 3D printing; Bending test specimen; TIG welding; Strength; Additive material.*

1. TỔNG QUAN

Công nghệ hàn TIG (Tungsten Inert Gas) đã trở thành một phương pháp quan trọng trong chế tạo các sản phẩm kim loại, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác và chất lượng cao như chế tạo mẫu thử độ bền uốn [1]. Trong bối cảnh ngành công nghiệp cơ khí tại Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ, việc nghiên cứu và ứng dụng hàn TIG để chế tạo các mẫu thử không chỉ đáp ứng nhu cầu sản xuất mà còn góp phần nâng cao năng lực công nghệ trong nước [2]. Hàn TIG, với khả năng kiểm soát hồ quang ổn định và tạo ra mối hàn chất lượng cao, được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như ô tô, hàng không vũ trụ, và xây dựng, nhờ khả năng gia công các vật liệu kim loại đa dạng, từ thép cacbon đến hợp kim đặc biệt [3].

Việc chế tạo các mẫu thử độ bền uốn bằng phương pháp hàn TIG mang lại nhiều lợi ích, bao gồm khả năng tạo ra các mối hàn có độ bền cơ học cao và bề mặt mịn, đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật nghiêm ngặt [4]. Tuy nhiên, quá trình hàn TIG đối mặt với nhiều thách thức, đặc biệt trong việc kiểm soát các thông số như cường độ dòng điện, tốc độ hàn, và môi trường xung quanh, vốn có thể ảnh hưởng đến chất lượng mối hàn và tính chất cơ học của mẫu thử [5]. Các yếu tố như ứng suất dư, biến dạng nhiệt, và khuyết tật mối hàn (như rỗ khí hoặc nứt) có thể làm giảm độ bền uốn của sản phẩm nếu không được kiểm soát chặt chẽ [6]. Do đó, việc tối ưu hóa các thông số hàn TIG là cần thiết để đảm bảo độ chính xác và hiệu suất của các mẫu thử độ bền uốn.

Nghiên cứu này tập trung vào việc chế tạo các mẫu thử độ bền uốn bằng phương pháp hàn TIG, với mục tiêu đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn đến chất lượng mối hàn và tính chất cơ học của sản phẩm [7]. Các thông số như cường độ dòng điện, tốc độ di chuyển của mỏ hàn, góc điện cực, và độ dày lớp kim loại được phân tích để xác định điều kiện tối ưu, đảm bảo mẫu thử đạt yêu cầu về độ bền uốn và tính đồng nhất [8]. Ngoài ra, việc kiểm soát các yếu tố môi trường, chẳng hạn như độ ẩm và nhiệt độ, cũng đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu các khuyết tật và nâng cao chất lượng mối hàn [9]. Phương pháp hàn TIG, khi được tối ưu hóa, không chỉ cải thiện hiệu suất sản xuất mà còn giảm chi phí so với các phương pháp gia công truyền thống, mang lại lợi ích kinh tế đáng kể cho các doanh nghiệp Việt Nam [10].

Về mặt ứng dụng, các mẫu thử độ bền uốn chế tạo bằng hàn TIG có thể được sử dụng trong nhiều lĩnh vực, từ kiểm tra chất lượng vật liệu trong công nghiệp đến phát triển các chi tiết phức tạp trong ô tô và hàng không vũ trụ [11]. Nghiên cứu này không chỉ đóng góp vào việc xây dựng cơ sở lý thuyết và thực tiễn cho công nghệ hàn TIG mà còn hỗ trợ các doanh nghiệp trong nước giảm phụ thuộc vào công nghệ nhập khẩu, từ đó nâng cao khả năng cạnh tranh trên thị trường quốc tế [12]. Hơn nữa, việc phát triển các mẫu thử độ bền uốn chất lượng cao còn mở ra tiềm năng ứng dụng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ tin cậy cao, như chế tạo kết cấu thép hoặc sản xuất thiết bị y tế.

Nỗ lực nghiên cứu này mang ý nghĩa quan trọng trong việc thúc đẩy đổi mới công nghệ tại Việt Nam, đặc biệt trong bối cảnh ngành công nghiệp đang chuyển đổi sang các giải pháp sản xuất tiên tiến và bền vững [13]. Bằng cách tối ưu hóa quy trình hàn TIG, nghiên cứu không chỉ cải thiện chất lượng sản phẩm mà còn góp phần xây dựng nền tảng cho các công nghệ gia công kim loại hiện đại, hỗ trợ sự

phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí trong nước [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong nghiên cứu này, hệ thống máy hàn CNC 3 trục được sử dụng, kết hợp nguồn hàn TIG Jasic 250A W227 không bù dây để cung cấp năng lượng nung chảy kim loại trong quá trình in 3D kim loại. Phôi thép CT3, với kích thước 260 × 6 × t (mm), được cố định, trong khi điện cực hàn di chuyển theo quỹ đạo lập trình sẵn. Thành phần hóa học và tính chất cơ học của thép CT3 (Bảng 2.1) cho thấy độ bền kéo từ 373-461 N/mm², giới hạn chảy 225 N/mm², và độ cứng Brinell 130-160 HB, phù hợp cho các mẫu thử độ bền uốn.

Việc tối ưu hóa thông số hàn TIG đóng vai trò quan trọng để đảm bảo chất lượng mối hàn. Các thông số như dòng điện hàn (90-130 A), tốc độ hàn (12-15 mm/s), độ dày phôi (6-10 mm), và đặc biệt là góc di chuyển đầu điện cực (0°, 45°, 90°) được điều chỉnh để khảo sát ảnh hưởng đến độ bền uốn và chất lượng mối hàn (Bảng 2.3, 2.4). Góc di chuyển đầu điện cực là yếu tố chính, tác động đến quỹ đạo hàn và cơ tính của mẫu. Các thông số cố định như khoảng cách hồ quang (2 mm), đường kính điện cực (2.4 mm), và lưu lượng khí bảo vệ (13 L/phút) được giữ ổn định (Bảng 2.2).

Quá trình thí nghiệm dựa trên các nghiên cứu trước và thử nghiệm thăm dò để xác định thông số tối ưu, tránh khuyết tật như nứt, xốp, hoặc thiếu liên kết. Kết quả từ việc thay đổi góc di chuyển đầu điện cực giúp đánh giá ảnh hưởng của quỹ đạo đến độ ổn định hồ quang, độ sâu thâm nhập, và hình dạng mối hàn, từ đó nâng cao chất lượng mẫu thử trong in 3D kim loại.

Bảng 1. Thành phần hóa học – Tính chất cơ học thép CT3

Carbon	**Silic**	**Mangan**	**Phốt pho**	**Lưu huỳnh**
0.16	0.15	0.62 %	0.010	0.042
Độ bền kéo	Giới hạn chảy	Độ giãn dài	Độ cứng Brinell	Độ cứng Rockwell
373-461 N/mm^2	225 N/mm^2	22%	130-160 HB	45-48 HRC

Bảng 2. Thông số cố định trong quá trình hàn

Thông số	**CTWD & chiều dài hồ quang**	**Góc làm việc**	**Khoảng cách giữa 2 đường hàn**	**Đường kính điện cực**	**Góc mài điện cực**	**Lưu lượng khí bảo vệ**
Giá trị	4mm & 2mm	90	3mm	2.4mm	45	13 L/phút

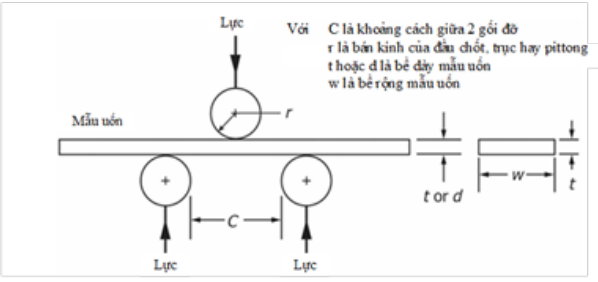
Bảng 3. Mức giá trị của các thông số đầu vào

Thông số hàn	**Mức giá trị**		
	1	**2**	**3**
Dòng điện hàn, I (A)	90	110	130
Tốc độ hàn, F (mm/s)	12	13.5	15
Độ dày phôi	6	8	10

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Quá trình nghiên cứu được thực hiện thông qua các bước chế tạo, gia công và kiểm tra mẫu thử in 3D kim loại sử dụng hàn TIG. Sau khi hàn các mẫu thép CT3 theo thông số thí nghiệm (Bảng 2.3, 2.4), các mẫu được xử lý theo sơ đồ quy trình thực nghiệm và xử lý mẫu (Hình 2.4, 2.5). Mẫu thử được gia công đạt kích thước chuẩn cho thử nghiệm uốn, tuân theo tiêu chuẩn ISO 7438 và ASTM E290. Quy trình gia công đảm bảo độ chính xác về kích thước và bề mặt trước khi tiến hành kiểm tra.

Thử nghiệm độ bền uốn được thực hiện trên máy thử vạn năng WE-1000B. Ứng suất bền uốn của mẫu được tính theo công thức: $\sigma = 3FC/(2wt^2)$, trong đó F là lực uốn, C là khoảng cách giữa các điểm tựa, w là chiều rộng mẫu, và t là độ dày mẫu. Công thức này giúp xác định khả năng chịu tải của mẫu dưới lực uốn, cung cấp dữ liệu về độ bền cơ học.



Hình 1. Mẫu uốn

Ngoài ra, cấu trúc tế vi của các mẫu được kiểm tra để đánh giá chất lượng mối hàn và ảnh hưởng của các thông số hàn TIG (dòng điện, tốc độ hàn, góc di chuyển đầu điện cực) đến tổ chức vật liệu. Các thông số như góc di chuyển đầu điện cực (0°, 45°, 90°) được phân tích để xác định ảnh hưởng đến độ bền uốn và tính đồng nhất của mối hàn. Dữ liệu đầu ra từ các thử nghiệm được thu thập và so sánh để xác định bộ thông số tối ưu, đảm bảo mẫu thử đạt yêu cầu kỹ thuật về độ bền và chất lượng bề mặt.

Quá trình nghiên cứu kết hợp thí nghiệm thực tế và phân tích dữ liệu nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa công nghệ in 3D kim loại sử dụng hàn TIG, góp phần nâng cao hiệu quả sản xuất và ứng dụng thực tiễn.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của công nghệ in 3D kim loại, việc đảm bảo chất lượng cơ học của sản phẩm là yếu tố then chốt để mở rộng ứng dụng vào các ngành công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và độ bền cao, như hàng không, y sinh và ô tô. Trong số các phương pháp hoàn thiện bề mặt sau in, hàn TIG (Tungsten Inert Gas) được xem là một giải pháp hiệu quả nhờ khả năng kiểm soát tốt năng lượng đưa vào vật liệu và chất lượng mối hàn. Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn TIG – bao gồm góc di chuyển đầu điện cực, dòng điện hàn, tốc độ hàn, và độ dày phôi – đến chất lượng mối hàn và độ bền uốn của mẫu in 3D kim loại. Trong đó, đặc biệt chú trọng đến ảnh hưởng của góc di chuyển đầu điện cực tại ba mức: 0°, 45° và 90°.

4.1. Ảnh hưởng của độ dày phôi đến độ bền uốn

Kết quả thử nghiệm uốn cho thấy, trong tất cả các thông số được khảo sát, độ dày phôi (ký hiệu t) đóng vai trò quyết định đến độ bền uốn của mẫu. Theo công thức tính ứng suất uốn $\sigma = 3FC/(2wt^2)$, có thể thấy ứng suất uốn tỷ lệ nghịch với bình phương độ dày phôi, do đó thay đổi nhỏ về t dẫn đến biến thiên đáng kể về độ bền.

Cụ thể, phôi có độ dày 6 mm cho kết quả nổi bật nhất về độ bền uốn. Nguyên nhân là

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

nhờ độ dày này đảm bảo độ thâm nhập mối hàn tốt, tạo nên cấu trúc hàn đồng nhất, tăng cường khả năng kết dính giữa các lớp vật liệu, từ đó cải thiện cơ tính tổng thể. Trong khi đó, các phôi có độ dày lớn hơn, như 8 mm và 10 mm, lại cho kết quả kém hơn. Ở các mẫu này, nhiệt lượng không đủ để thâm nhập sâu, dẫn đến diện tích tiếp xúc hàn thực tế bị giảm, tạo nên những vùng liên kết yếu và làm giảm độ bền cơ học.

4.2. Tác động của dòng điện hàn

Dòng điện hàn được khảo sát trong khoảng 90 A đến 130 A. Kết quả cho thấy, khoảng 90-110 A là tối ưu để đảm bảo độ sâu thâm nhập thích hợp và tránh hiện tượng quá nhiệt. Khi dòng điện đạt đến mức 110 A, mối hàn đạt độ bền cao nhờ nhiệt độ đủ để làm chảy kim loại đều và sâu.

Tuy nhiên, khi vượt quá ngưỡng 110 A, hiện tượng quá nhiệt bắt đầu xảy ra. Điều này dẫn đến sự phát triển quá mức của hạt kim loại, tạo ra cấu trúc thô, dễ nứt vỡ, và xuất hiện các khuyết tật vi mô như rỗ khí hoặc vùng không thâm nhập hoàn toàn. Kết quả là độ bền uốn bị giảm sút đáng kể ở những mẫu được hàn với cường độ dòng điện quá cao.

4.3. Ảnh hưởng của tốc độ hàn

Tốc độ di chuyển mỏ hàn cũng là một yếu tố đáng lưu ý trong quá trình hàn TIG. Nghiên cứu khảo sát các mức tốc độ từ 12 mm/s đến 15 mm/s. Kết quả chỉ ra rằng, tốc độ hàn quá cao làm giảm thời gian tác dụng nhiệt, khiến kim loại không kịp nóng chảy hoàn toàn, dẫn đến mối hàn mỏng, thiếu độ sâu và dễ xuất hiện khuyết tật. Tuy nhiên, trong điều kiện thỏa đáng về dòng điện và độ dày phôi, ảnh hưởng của tốc độ hàn được ghi nhận là không quá rõ rệt đến độ bền uốn, miễn là nằm trong giới hạn cho phép.

4.4. Góc di chuyển đầu điện cực và độ bền uốn

Góc di chuyển của đầu điện cực ảnh hưởng trực tiếp đến hướng và cường độ truyền năng lượng vào vật liệu. Trong nghiên cứu này, ba mức góc di chuyển được khảo sát: 0°, 45° và 90°. Kết quả cho thấy:

• Góc 90° là tối ưu nhất về độ bền uốn, cho kết quả cao và ổn định. Với góc này, tia hồ quang tập trung trực tiếp vào vị trí hàn, đảm bảo năng lượng được phân bố đồng đều theo chiều sâu và chiều ngang.

• Góc 0°, tương ứng với tư thế hàn song song với bề mặt phôi, cho kết quả kém nhất, do năng lượng chủ yếu lan tỏa bề mặt, gây thiếu thâm nhập và mối hàn yếu.

• Góc 45° cho kết quả trung bình, tuy đạt được một số mẫu có độ bền khá cao, nhưng lại thiếu tính ổn định, khi một số mẫu khác thể hiện độ bền kém. Điều này có thể do sự khó kiểm soát về độ đồng đều của tia hồ quang ở góc nghiêng trung gian.

4.5. Mô hình hóa bằng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)

Để dự đoán và xác minh tính tin cậy của dữ liệu thực nghiệm, một mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) đã được huấn luyện dựa trên tập dữ liệu đầu vào gồm: độ dày phôi, dòng điện, tốc độ hàn và góc di chuyển điện cực. Kết quả đánh giá mô hình ANN cho thấy hệ số tương quan $R > 0.96$, chứng tỏ rằng mô hình có khả năng học tốt từ dữ liệu thực nghiệm và cho kết quả dự đoán đáng tin cậy.

Các biểu đồ dự đoán (Hình 3.2, 3.3, 3.4) thể hiện rằng mô hình ANN đã xác nhận các xu hướng đã quan sát được trong thực nghiệm, như: ☞

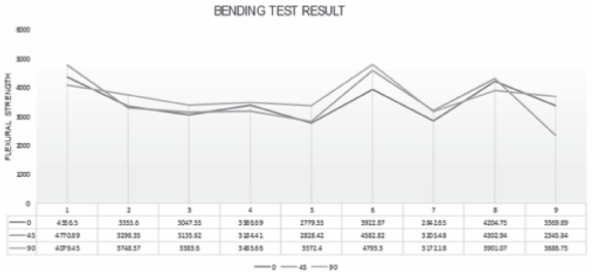
• Độ bền uốn cao nhất khi sử dụng phôi dày 6 mm;
• Dòng điện 110 A là tối ưu;
• Góc 90° mang lại hiệu quả vượt trội;
• Tốc độ hàn ảnh hưởng không đáng kể.

4.6. Tối ưu hóa thông số bằng phương pháp Taguchi kết hợp ANN

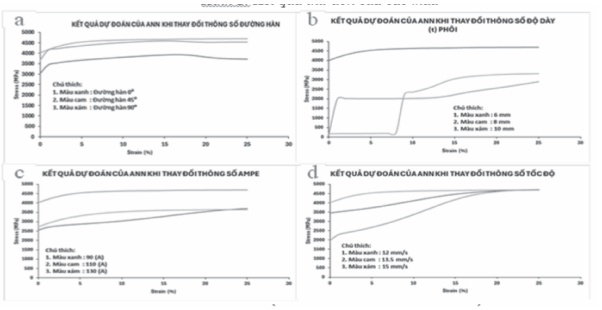
Nhằm xác định tổ hợp thông số hàn tối ưu, nghiên cứu đã áp dụng phân tích Taguchi, kết hợp với kết quả dự đoán từ mô hình ANN. Kết quả phân tích xác nhận rằng tổ hợp thông số tối ưu bao gồm:

• Góc di chuyển đầu điện cực: 90°;
• Độ dày phôi: 6 mm;
• Dòng điện hàn: 110 A;
• Tốc độ hàn: 13 mm/s (trung bình).

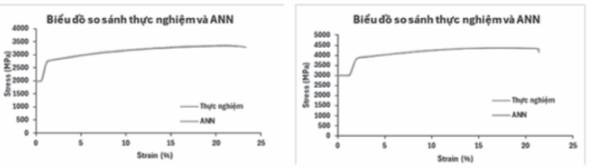
Tổ hợp thông số này cho giá trị độ bền uốn cao nhất, đồng thời đảm bảo tính ổn định và lặp lại trong quy trình sản xuất.



Hình 2. Kết quả thử uốn của các mẫu



Hình 3. Dự đoán ANN về ảnh hưởng của của các tham số



Hình 4. So sánh thực nghiệm với ANN

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thành công trong việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn TIG đến chất lượng mối hàn và độ bền uốn của mẫu in 3D kim loại, sử dụng thép CT3. Kết quả cho thấy độ dày phôi 6 mm, dòng điện hàn 110 A, và góc di chuyển đầu điện cực 90° là bộ thông số tối ưu, mang lại độ bền uốn cao nhất và mối hàn đồng nhất. Góc di chuyển 90° đảm bảo tính ổn định và chất lượng vượt trội so với 0° và 45°. Mô hình ANN với độ tin cậy R > 0,96 đã xác nhận tính chính xác của dữ liệu thực nghiệm và hỗ trợ dự đoán thông số tối ưu. Phương pháp kết hợp hàn TIG không bù dây và gia công CNC không chỉ giảm chi phí mà còn rút ngắn thời gian sản xuất, mở ra tiềm năng ứng dụng thực tiễn tại Việt Nam. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học để cải tiến công nghệ in 3D kim loại, góp phần nâng cao năng lực sản xuất trong nước, giảm phụ thuộc công nghệ nhập khẩu và đáp ứng nhu cầu thị trường.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Thái Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Trần Quang Vinh, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng, Phan Thanh Nhàn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường

Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-356.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Singh, M., & Singh, S. (2021), "*Multiple response optimization of ultrasonic assisted electric discharge machining of Nimonic 75: a Taguchi-grey relational analysis approach*". Materials Today: Proceedings, 45, 4731-4736. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.173

[2]. BalaramNaik, A., & Chennakeshava Reddy, A. (2018), "*Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA)*". Therm Sci Eng Prog, 8, 327-339. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.005

[3]. Paventhan, R., Lakshminarayanan, P. R., & Balasubramanian, V. (2011), "*Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints*". Materials & Design, 32(4), 1888-1894. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.011

[4]. Argade, G. R., Shukla, S., Liu, K., & Mishra, R. S. (2018), "*Friction Stir lap welding of stainless steel and plain carbon steel to enhance corrosion properties*". Journal of Materials Processing Technology, 259, 259-269. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.048

[5]. Kant, R., Mittal, C., Kumar, B. S., Rana, M., & Kumar, R. (2018), "*Fabrication and characterization of weldments AISI 304 and AISI 316 used in industrial applications*". Materials Today: Proceedings, 5(9), 18475-18481.

[6]. Sridhara, S. N., Allada, S. C. S., PV, S. S., Banala, S., Subbiah, R., & Marichamy, S. (2020), "*Tensile strength performance and optimization of Al 7068 using TIG welding process*". Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.481

[7]. Shanmugasundar, G., Karthikeyan, B., & Vignesh, V. (2019), "*Optimization of process parameters in TIG welded joints of AISI 304L-austenitic stainless steel using Taguchi's experimental design method*". Materials Today: Proceedings, 16, 1188-1195.

[8]. Silwal, B., & Santangelo, M. (2018), "*Effect of vibration and hot-wire gas tungsten arc (GTA) on the geometric shape*". Journal of Materials Processing Technology, 251, 138-145. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.010

[9]. Ramana, M. V., Kumar, B. V. R. R., Krishna, M., Rao, M. V., & Kumar, V. S. (2020), "*Optimization and influence of process parameters of dissimilar SS304L - SS430 joints produced by robotic TIG welding*". Materials Today: Proceedings, 23, 479-482. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.388

[10]. Bu, Y., & Gardner, L. (2018), "*Local stability of laser-welded stainless steel I-sections in bending*". Journal of Constructional Steel Research, 148, 49-64. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.05.010

[11]. Yan, S., Shi, Y., Liu, J., & Ni, C. (2019), "*Effect of laser mode on microstructure and corrosion resistance of 316L stainless steel weld joint*". Optics and Laser Technology, 113, 428-436. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.01.023

[12]. Keskitalo, M., Sundqvist, J., Mäntyjärvi, K., Powell, J., & Kaplan, A. F. H. (2015), "*The influence of shielding gas and heat input on the mechanical properties of laser welds in ferritic stainless steel*". In Physics Procedia (Vol. 78, pp. 222-229). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.032

[13]. Wu, S. K., Zheng, K., Zou, J. L., Jiang, F., & Han, X. H. (2018), "*A study of the behavior and effects of nitrogen take-up from protective gas shielding in laser welding of stainless steel*". Journal of Manufacturing Processes, 34, 477-485. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.031

[14]. Mohammad, H., & Tayebi, M. (2018), "*Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding*". Journal of Alloys and Compounds, 767, 112-121. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.302

CHẾ TẠO TẤM KHUÔN BẰNG PHƯƠNG PHÁP TẠO HÌNH THEO LỚP

MANUFACTURE A MOLD USING THE LAYERED FORMING METHOD

Nguyễn Thuỳ Diễm Quyên, Trần Thanh Thưởng, Vũ Quang Huy, Đỗ Văn Đại*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 21144118@student.hcmute.edu.vn; thuongtt@hcmute.edu.vn; huyvq@hcmute.edu.vn; *daidv@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ứng dụng công nghệ Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) để chế tạo khuôn cho sản phẩm nhựa 2D, nhằm đánh giá khả năng tạo khuôn chính xác, tiết kiệm chi phí và thời gian so với phương pháp truyền thống. Nghiên cứu gồm hai phần: lý thuyết và thực nghiệm. Phần lý thuyết phân tích cơ chế WAAM, vật liệu sử dụng và ứng dụng trong ngành khuôn mẫu. Phần thực nghiệm chế tạo khuôn với các thông số tối ưu như dòng điện hàn và loại dây kim loại. Kết quả cho thấy WAAM là giải pháp hiệu quả, linh hoạt và tiết kiệm, hứa hẹn ứng dụng rộng rãi trong sản xuất khuôn mẫu để tối ưu hóa quy trình.

Từ khóa: *WAAM; Khuôn phun ép nhựa; Tối ưu hóa; Thời gian phun ép.*

ABSTRACT

This paper explores the use of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) for producing molds used in 2D plastic product fabrication. It aims to assess WAAM's efficiency and viability in achieving precise molds while reducing time and costs compared to conventional techniques. The study is divided into two sections: theoretical and experimental analysis. The theoretical section reviews literature on WAAM, examining its operational principles, suitable materials, and applications in mold production. In the experimental section, molds for 2D plastic products are fabricated using WAAM, with optimized parameters like welding current and metal wire type. The findings validate WAAM as a practical and effective approach for mold manufacturing. Offering cost-effective customization and streamlined production, WAAM shows significant promise for broad adoption in the mold-making industry, particularly for enhancing efficiency and minimizing production time.

Keywords: *Ex-WAAM; Injection mold; Production process; Cycle time.*

1. TỔNG QUAN

Công nghệ Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) đang nổi lên như một giải pháp tiên tiến trong chế tạo khuôn phun ép nhựa, một thành phần thiết yếu trong ngành sản xuất nhựa [1]. WAAM sử dụng hồ quang điện và dây kim loại để tạo cấu trúc từng lớp, mang lại lợi ích vượt trội như giảm chi phí, rút ngắn thời gian sản xuất và tăng tính linh hoạt trong thiết kế [2]. So với các phương pháp gia công truyền thống như phay CNC, WAAM cho phép chế tạo khuôn có hình dạng phức tạp với hiệu quả kinh tế cao, đồng thời giảm thiểu lãng phí vật liệu [3]. Trong bối cảnh ngành công nghiệp nhựa Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ, việc ứng dụng WAAM để chế tạo tấm khuôn không chỉ đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật mà còn nâng cao năng lực sản xuất trong nước, giảm phụ thuộc vào công nghệ nhập khẩu [4].

Khuôn phun ép nhựa đòi hỏi độ chính xác cao, độ bền cơ học tốt và khả năng chịu nhiệt để đảm bảo chất lượng sản phẩm nhựa [5]. Các yếu tố như thông số công nghệ (dòng điện hàn, tốc độ nạp dây, góc nghiêng) và tính chất vật liệu (độ co rút, độ cứng) ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và chất lượng của khuôn [6]. WAAM cho phép kiểm soát chính xác các thông số này, tạo ra các tấm khuôn chất lượng cao, phù hợp với các sản phẩm nhựa 2D và 3D [7]. Tuy nhiên, quá trình WAAM đối mặt với các thách thức như ứng suất dư do nhiệt, biến dạng vật liệu và độ hoàn thiện bề mặt chưa tương đương với các phương pháp truyền thống, đòi hỏi nghiên cứu sâu hơn để tối ưu hóa quy trình [8].

Nghiên cứu này tập trung phát triển và tối ưu hóa quy trình chế tạo tấm khuôn bằng WAAM, với mục tiêu xác định các thông số kỹ thuật tối ưu như cường độ dòng điện, tốc độ nạp dây kim loại và loại vật liệu dây [9]. Một trong những mục tiêu quan trọng là so sánh chi phí sản xuất khuôn bằng WAAM với các phương pháp truyền thống để đánh giá tính khả thi kinh tế, đặc biệt trong điều kiện sản xuất tại Việt Nam, nơi các doanh nghiệp thường đối mặt với hạn chế về nguồn vốn [10]. Ngoài ra, nghiên cứu phân tích các đặc tính cơ học của khuôn WAAM, bao gồm độ bền, độ cứng, khả năng chịu nhiệt và độ chính xác hình học, nhằm so sánh với các khuôn chế tạo bằng gia công cơ khí truyền thống [11]. Những phân tích này cung cấp cơ sở để đánh giá ưu thế kỹ thuật của WAAM và khả năng ứng dụng thực tiễn trong ngành công nghiệp nhựa, đặc biệt đối với các sản phẩm nhựa 2D [12].

Về phương pháp, nghiên cứu kết hợp mô phỏng số và thử nghiệm thực nghiệm. Các phần mềm như ANSYS được sử dụng để dự đoán ứng suất và biến dạng trong quá trình tạo hình theo lớp, từ đó tối ưu hóa thiết kế khuôn và quy trình chế tạo. Các thí nghiệm thực nghiệm tập trung vào việc chế tạo các tấm khuôn mẫu bằng WAAM, sử dụng các loại dây kim loại như thép không gỉ hoặc hợp kim nhôm, và đánh giá chất lượng sản phẩm thông qua các phép đo cơ học và kiểm tra không phá hủy. Kết quả nghiên cứu cung cấp các tiêu chuẩn quy trình để đảm bảo chất lượng và độ tin cậy của khuôn WAAM, đồng thời đề xuất các cải tiến nhằm nâng cao hiệu suất và mở rộng phạm vi ứng dụng của công nghệ này.

Về mặt kinh tế, WAAM có tiềm năng giảm chi phí thiết bị và vật liệu so với các phương pháp truyền thống, giúp các doanh nghiệp Việt Nam tiếp cận công nghệ tiên tiến với chi phí hợp lý. Công nghệ này cũng cho phép sản xuất khuôn theo yêu cầu.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) là công nghệ in 3D kim loại sử dụng dây kim loại và hồ quang điện để đắp lớp, tạo ra các chi tiết lớn với tốc độ cao và đa dạng vật liệu như thép không gỉ, nhôm, titan. Quy trình WAAM, điều khiển bằng CAD/CAM, làm nóng chảy dây kim loại, đắp từng lớp để tạo hình chính xác. Đối với khuôn nhựa, thép không gỉ và nhôm được ưu tiên nhờ độ bền và khả năng dẫn nhiệt.

WAAM vượt trội với chi phí thấp, giảm lãng phí vật liệu, và không cần khuôn đúc đắt đỏ như phương pháp truyền thống. Công nghệ này cho phép sản xuất nhanh, tạo chi tiết lớn, phức tạp mà các phương pháp như SLM khó thực hiện. WAAM linh hoạt trong thiết kế, dễ dàng chỉnh sửa qua mô hình CAD, đồng thời đảm bảo độ bền và tính chất cơ học tối ưu thông qua điều chỉnh thông số như dòng điện và tốc độ dây.

Trong chế tạo khuôn nhựa 2D, WAAM giảm chi phí và thời gian sản xuất, hỗ trợ tùy chỉnh thiết kế linh hoạt, tạo khuôn phức tạp với độ bền, chịu nhiệt cao. Công nghệ này giảm thiểu lãng phí vật liệu, cho phép tái sử dụng và sửa chữa khuôn, hứa hẹn ứng dụng rộng rãi trong ngành nhựa.

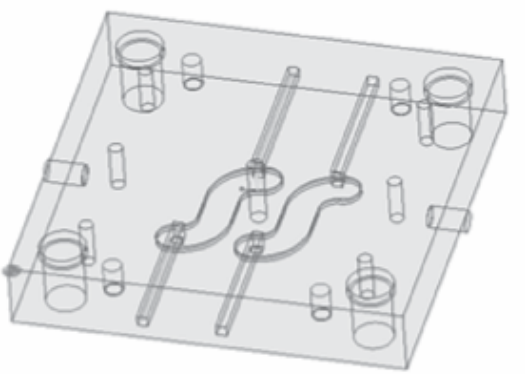
3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Creo Parametric, phát triển bởi PTC, là phần mềm CAD/CAM/CAE mạnh mẽ, hỗ trợ thiết kế, mô phỏng và sản xuất cơ khí. Phần mềm này cho phép mô phỏng chính xác, tối ưu hóa thiết kế và sản xuất khuôn ép nhựa, đảm bảo hiệu quả và độ tin cậy. Kết quả mô phỏng giúp điều chỉnh các thông số, nâng cao chất lượng quy trình sản xuất.

Trong thiết kế sản phẩm nhựa 2D, Creo Parametric mô phỏng hình dạng sản phẩm, hỗ trợ phân tích và tối ưu hóa. Sau khi tách khuôn, phần mềm tạo ra tấm cavity và tấm core. Thay vì giữ nguyên khối, các tấm này được cắt thành nhiều lớp (layer), hình thành các lòng khuôn từ các tầng mỏng. Quy trình này tăng tính linh hoạt, giảm chi phí và thời gian sản xuất so với phương pháp truyền thống.



Hình 1. Hình dạng sản phẩm



Hình 2. Tấm khuôn của khuôn phun ép sản phẩm nhựa dạng 2D

Hình ảnh minh họa từ Creo Parametric cho thấy sản phẩm nhựa 2D và các tấm cavity, core sau khi phân lớp, thể hiện rõ khả năng mô phỏng chi tiết và chính xác của phần mềm. Creo Parametric không chỉ hỗ trợ thiết kế mà còn cải thiện hiệu suất chế tạo khuôn, phù hợp với các yêu cầu phức tạp trong ngành sản xuất nhựa.

Bảng 1. Chỉ số cấp bền Thép C45

Mác thép	Tiêu chuẩn	Độ bền đứt σ_b (Mpa)	Độ bền đứt σ_c (Mpa)	Độ bền dãn tương đối δ (%)	Độ cứng HRC
C45	TCVN 1766-75	610	360	16	23

Bảng 2. Thành phần hóa học của Thép C45

Mác thép	C (%) min-max	Si (%) min-max	Mn (%) min-max	P (%) tối đa	S (%) tối đa	Cr (%) min-max
C45	0,42-0,50	0,15-0,35	0,50-0,80	0,025	0,025	0,20-0,40

Bảng 3. Đặc tính cơ học của Thép C45

Mác thép	Điều kiện	Yield Strength (Mpa)	Sức căng (Mpa)	Elon-gation A5 (%)	Độ cứng HRC	Nhiệt độ	Benda-khả năng	Độ dày danh nghĩa, t	
								1,95mm≤t≤10.0mm	
								Cán	Nung
C45	Cán	460	750	18	58	820	Bán kính uốn cong (≤90°)	2,0 x t	1,0 x t
	Nung	330	540	30	55	860			
	Nước ngập nước		2270						
	Dầu ngập		1980						

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong những năm gần đây, công nghệ sản xuất phụ gia bằng hồ quang dây (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM) đã dần khẳng định vị trí quan trọng trong lĩnh vực chế tạo các chi tiết kim loại kích thước lớn và phức tạp. Một trong những ứng dụng nổi bật là gia công khuôn ép nhựa thông qua hàn đắp các lớp vật liệu kim loại. Hình 3 minh họa chi tiết các mối hàn sau khi tiến hành hàn đắp từng lớp kim loại để hình thành cấu trúc tấm khuôn.

Kết quả chế tạo bằng phương pháp WAAM cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc tạo hình các tấm kim loại dùng làm phần cavity và core của khuôn (Hình 4). Những tấm này là thành phần chính cấu thành lòng khuôn và lõi khuôn trong khuôn ép nhựa. So với các phương pháp chế tạo khuôn truyền thống vốn đòi hỏi gia công cơ khí tốn kém thời gian và chi phí, phương pháp hàn đắp lớp bằng WAAM giúp rút ngắn đáng kể chu trình sản xuất và tiết kiệm nguyên vật liệu. Thay vì phải phay tiện nguyên khối, kỹ thuật WAAM cho phép xây dựng lòng khuôn bằng cách đắp từng lớp vật liệu kim loại theo hình dạng mong muốn, tạo ra cấu trúc rỗng bên trong để cải thiện khả năng làm mát và giảm khối lượng.

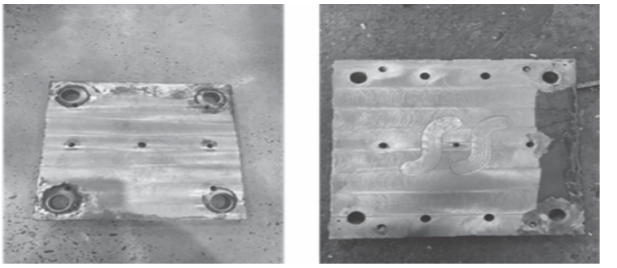


Hình 3. Mối hàn sau khi hàn đắp các tấm

Một trong những lợi ích quan trọng mà WAAM mang lại chính là khả năng tối ưu hóa quá trình chế tạo khuôn. Các đặc điểm như thời gian sản xuất ngắn hơn, chi phí vật liệu thấp hơn, và khả năng tạo hình các kết cấu rỗng cho phép cải thiện hiệu quả làm mát trong khuôn, từ đó tăng tốc độ chu trình ép nhựa và kéo dài tuổi thọ khuôn. Đồng thời, công nghệ này hỗ trợ linh hoạt trong việc tạo các hình học phức tạp, giúp thiết kế khuôn có cấu trúc tối ưu phù hợp với yêu cầu của từng sản phẩm cụ thể.

Tuy nhiên, quá trình áp dụng WAAM vào chế tạo khuôn không phải không có những thách thức. Một trong các vấn đề kỹ thuật thường gặp là độ kín không hoàn hảo của các lớp hàn đắp. Quan sát thực tế cho thấy một số khe hở nhỏ giữa các lớp kim loại chưa được hàn kín hoàn toàn, dẫn đến hiện tượng rò rỉ nước trong quá trình làm mát khuôn. Điều này ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất hoạt động của khuôn trong quá trình ép nhựa, đặc biệt là khi cần sử dụng áp suất cao và tuần hoàn nước làm mát. Những lỗi như vậy yêu cầu phải xử lý bề mặt hoặc thực hiện gia công bổ sung để đảm bảo độ kín và độ bền cần thiết cho khuôn vận hành ổn định.

Hình 5 trình bày bộ khuôn hoàn chỉnh sau khi thực hiện các bước hàn đắp và gia công bổ sung. Các chi tiết đã được lắp ráp chính xác, sẵn sàng cho quá trình thử nghiệm. Kết quả từ việc thử ép nhựa bằng bộ khuôn này được minh họa trong Hình 6, với sản phẩm nhựa dạng 2D được tạo hình rõ ràng, đúng với thiết kế ban đầu. Điều này chứng minh rằng công nghệ WAAM hoàn toàn có khả năng đáp ứng các tiêu chuẩn về độ chính xác hình học và độ bền trong chế tạo khuôn cho các sản phẩm nhựa công nghiệp.



Hình 4. Hình ảnh tấm cavity và tấm core sau khi hàn đắp

Từ góc độ kinh tế, công nghệ WAAM chứng tỏ ưu thế vượt trội. Chi phí sản xuất khuôn giảm đáng kể nhờ tận dụng nguyên liệu dây hàn sẵn có và loại bỏ các công đoạn phay tiện nặng nề. Tốc độ hàn đắp lớp cao giúp rút ngắn thời gian chế tạo khuôn, nâng cao năng suất, đồng thời giảm thiểu lượng phế liệu phát sinh trong quá trình sản xuất. Nhờ vậy, các doanh nghiệp có thể rút ngắn chu kỳ đưa sản phẩm ra thị trường, tăng tính cạnh tranh và giảm chi phí đầu tư ban đầu.

Về mặt kỹ thuật, khuôn được chế tạo bằng WAAM có khả năng đáp ứng tốt các yêu cầu về cơ tính như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu lực. Tuy nhiên, chất lượng bề mặt của các chi tiết hàn đắp thường chưa đạt độ bóng cần thiết, đặc biệt là tại các vùng tiếp xúc trực tiếp với sản phẩm nhựa. Do đó, các công đoạn hoàn thiện bề mặt như mài, phay hoặc đánh bóng vẫn là bắt buộc sau khi hàn đắp, nhằm đảm bảo độ nhẵn và chính xác cho bề mặt làm việc của khuôn.



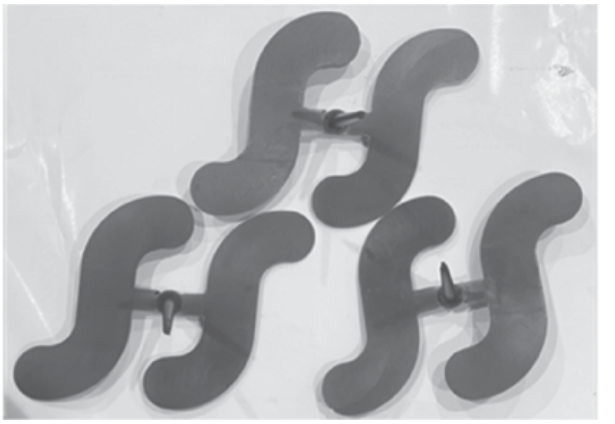
Hình 5. Hình ảnh bộ khuôn hoàn chỉnh

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Một điểm mạnh khác của WAAM là khả năng tùy biến linh hoạt trong thiết kế khuôn. Bằng cách sử dụng phần mềm mô phỏng CAD/CAM kết hợp với điều khiển CNC, các kỹ sư có thể thiết kế khuôn theo yêu cầu đặc biệt mà không bị giới hạn bởi hình dạng khối nguyên vật liệu. Kết cấu rỗng bên trong hoặc kênh làm mát tích hợp có thể được tích hợp ngay từ bước thiết kế, thay vì phải khoan hoặc gia công phức tạp như phương pháp truyền thống. Điều này không chỉ cải thiện hiệu suất làm việc của khuôn mà còn giảm chi phí bảo trì và thay thế.

Tuy nhiên, nhược điểm cố hữu của WAAM vẫn tồn tại, điển hình là sự xuất hiện của các khuyết tật như rỗ khí hoặc lỗ hổng nhỏ trong mối hàn. Những khiếm khuyết này không chỉ ảnh hưởng đến độ kín mà còn tiềm ẩn nguy cơ nứt vỡ khi khuôn làm việc dưới điều kiện áp suất cao hoặc nhiệt độ dao động mạnh. Do đó, cần có những cải tiến kỹ thuật trong quá trình hàn, chẳng hạn như tối ưu thông số dòng điện, tốc độ di chuyển, góc nghiêng của đầu hàn, hoặc sử dụng khí bảo vệ hiệu quả hơn để hạn chế quá trình oxy hóa và bọt khí trong mối hàn.

Ngoài ra, việc tích hợp các kỹ thuật kiểm tra không phá hủy (NDT) như siêu âm, chụp X-quang hoặc kiểm tra dòng xoáy có thể giúp phát hiện sớm các khuyết tật trong mối hàn để từ đó điều chỉnh quy trình sản xuất phù hợp. Sự kết hợp giữa WAAM và công nghệ kiểm tra hiện đại sẽ tạo nền tảng vững chắc cho việc ứng dụng công nghệ này trong môi trường sản xuất công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và độ tin cậy cao.



Hình 6. Sản phẩm nhựa dạng 2D sau khi ép thử

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu ứng dụng công nghệ Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) trong chế tạo khuôn phun ép nhựa 2D đã mang lại những kết quả đáng ghi nhận, khẳng định tiềm năng của phương pháp này trong ngành sản xuất. Các kết luận chính được liệt kê như sau:

• Hiệu quả kinh tế: WAAM giảm đáng kể chi phí sản xuất và thời gian chế tạo khuôn so với phương pháp truyền thống, tăng tính cạnh tranh cho doanh nghiệp.

• Chất lượng khuôn: Khuôn WAAM đạt yêu cầu về độ bền và độ cứng, phù hợp cho sản xuất sản phẩm nhựa 2D, nhưng cần cải thiện độ chính xác và chất lượng bề mặt.

• Tính linh hoạt: WAAM cho phép tạo khuôn với hình dạng phức tạp, hỗ trợ tùy chỉnh thiết kế nhanh chóng thông qua mô hình CAD, giảm thời gian điều chỉnh.

• Hạn chế kỹ thuật: Các mối hàn đắp layer dễ bị rỗ khí, gây rò rỉ nước qua khe hở, đòi hỏi gia công bổ sung và cải tiến kỹ thuật hàn.

☞

• Tiềm năng phát triển: WAAM là giải pháp tiên tiến, hứa hẹn mở rộng ứng dụng trong sản xuất khuôn và chi tiết kim loại, cần thêm nghiên cứu để tối ưu hóa quy trình.

Nghiên cứu này đặt nền tảng cho việc ứng dụng WAAM, khuyến nghị đầu tư vào cải tiến công nghệ để nâng cao độ chính xác và chất lượng sản phẩm.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Trọng Hiếu;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Thuỳ Diễm Quyên, Trần Thanh Thưởng, Vũ Quang Huy, Đỗ Văn Đại.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-367.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**
Ngày phản biện: **22/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Sha, B., Dimov, S., Griffiths, C., & Packianather, M. S. (2007), "*Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality*". Journal of Materials Processing Technology, 183(2-3), 284-296. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.019

[2]. Giboz, J., Copponnex, T., & Mélé, P. (2007), "*Micro injection molding of thermoplastic polymers: A review*". Journal of Micromechanics and Microengineering, 17(6), R96. https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/6/R02

[3]. Bellantone, V., Surace, R., Trotta, G., & Fassi, I. (2013) "*Replication capability of micro injection moulding process for polymeric parts manufacturing*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(5-8), 1407-1421. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4577-2

[4]. Jelínek, P., & Adámkov, E. (2014), "*Lost cores for high-pressure die casting*". Archives of Foundry Engineering, 14(2), 101-104. https://doi.org/10.2478/afe-2014-0045

[5]. Gong, X., Liu, X., Chen, Z., Yang, Z., Jiang, W., & Fan, Z. (2021), "*3D printing of high-strength water-soluble salt cores via layered extrusion forming*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-546973/v1

[6]. Liu, F., et al. (2020), "*Comparative study on performance and microstructure of composite water-soluble salt core material for manufacturing hollow zinc alloy castings*". Materials Chemistry and Physics, 252, Article 123257. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123257

[7]. Attia, U. M., Marson, S., & Alcock, J. R. (2014), "*Design and fabrication of a three-dimensional microfluidic device for blood separation using micro-injection moulding*". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 228(6), 941-949. https://doi.org/10.1177/0954405413510153

[8]. Packianather, M., Griffiths, C., & Kadir, W. (2015), "*Micro injection moulding process parameter tuning*". Procedia CIRP, 33, 400-405. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.093

[9]. Rodrigues, R. O., Lima, R., Gomes, H. T., & Silva, A. M. T. (2015), "*Polymer microfluidic devices: An overview of fabrication methods*". U.Porto Journal of Engineering, 1(1), 67-79. https://doi.org/10.24840/2183-6493_001.001_0007

[10]. Vaezi, M., Seitz, H., & Yang, S. (2013), "*A review on 3D micro-additive manufacturing technologies*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(5-8), 1721-1754. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4605-2

[11]. Goodship, V. (Ed.) (2017), "*ARBURG practical guide to injection moulding*". Smithers Rapra.

[12]. Sommacal, B., Savic, M., Filippi, A., Kühl, S., & Thieringer, F. (2018), "*Evaluation of two 3D printers for guided implant surgery*". International Journal of Oral and Maxillofacial Implants, 33(4), 743-746. https://doi.org/10.11607/jomi.6074

THỬ NGHIỆM MODULE GIỮ VÀ CHẤN ỐNG KIM LOẠI

TEST THE METAL TUBE HOLDING AND CLAMPING MODULE

Nguyễn Văn Hoàng Long, Nguyễn Khắc Nhàn, Đỗ Văn Hiến, Âu Thị Kim Loan*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21146122@student.hcmute.edu.vn;
nhannk@hcmute.edu.vn;
hiendv@hcmute.edu.vn;
**autkl@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Mục tiêu là tự động hóa quy trình bẻ ống, đảm bảo độ chính xác và đồng đều, nâng cao năng suất, tiết kiệm thời gian và giảm thiểu sai sót trong sản xuất. Máy gồm các bộ phận chính: khung máy, hệ thống cấp ống, hệ thống cán ống, hệ thống bẻ ống và hệ thống điều khiển. Máy hoạt động nhờ động cơ truyền lực qua cơ cấu đai, đưa ống vào hệ thống cán, sau đó chuyển đến bộ phận bẻ ống. Tại đây, động cơ điều khiển tấm đẩy, khiến con lăn bẻ ống di chuyển theo phương thẳng đứng. Hệ thống bẻ ống sử dụng cụm con lăn giảm ma sát, được thiết kế với hai cụm gồm hai và năm con lăn, tích hợp kiến thức chuyên môn vào quá trình thực hiện dự án. Thiết kế được thực hiện bằng phần mềm Inventor và SOLIDWORKS, đảm bảo độ chính xác và hiệu quả.

Từ khóa: *Tạo hình kim loại; Sản phẩm dạng ống; Biến dạng dẻo; Ống có thành mỏng.*

ABSTRACT

The purpose is to automate the pipe-breaking process, ensuring precision, consistency, enhanced productivity, time savings, and reduced manufacturing errors. The machine comprises a frame, pipe-feeding system, pipe-rolling system, pipe-breaking system, and control system. It operates using a motor that drives a belt mechanism to feed the pipe into the rolling system, then to the breaking system. The breaking system, powered by a motor, moves the plate to vertically displace the pipe-breaking roller. The pipe-breaking machine employs a friction-reducing roller assembly, designed with two clusters of two and five rollers, integrating knowledge from relevant disciplines into the project. The design is created using Inventor and SOLIDWORKS software.

Keywords: *Metal forming; Tubular products; Plastic deformation; Thin-walled tubes.*

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh đất nước đang phát triển, lĩnh vực khoa học và công nghệ tại Việt Nam vẫn đối mặt với những thách thức. Sự phát triển của ngành công nghiệp sản xuất tại Việt Nam, đặc biệt trong các lĩnh vực như ô tô, xe máy, cơ khí và xây dựng, đã làm gia tăng nhu cầu về các sản phẩm ống kim loại với độ chính xác và chất lượng cao [1]. Ống kim loại, đặc biệt là ống thép, đóng vai trò quan trọng trong các ứng dụng kết cấu, hệ thống dẫn chất lỏng và các sản phẩm trang trí, đòi hỏi quy trình gia công hiệu quả và chính xác [2]. Tuy nhiên, các phương pháp gia công ống truyền thống như bẻ ống bằng lò nung hoặc kẹp tay thường không đáp ứng được yêu cầu về độ chính xác, tính đồng nhất và năng suất, dẫn đến chi phí sản xuất cao và khó cạnh tranh với các sản phẩm nhập khẩu [3]. Trong bối cảnh công nghiệp hóa và hiện đại hóa, việc nghiên cứu và phát triển các thiết bị tự động hóa, chẳng hạn như module giữ và chấn ống kim loại, trở thành một hướng đi chiến lược nhằm nâng cao năng lực sản xuất trong nước [4].

Nghiên cứu "Thử nghiệm module giữ và chấn ống kim loại" được thực hiện nhằm thiết kế, chế tạo và đánh giá hiệu quả của một module tự động hóa quy trình bẻ ống, với mục tiêu đảm bảo độ chính xác, tính đồng đều và nâng cao năng suất sản xuất [5]. Module này tích hợp các công nghệ tiên tiến từ các lĩnh vực cơ học, vật liệu, tự động hóa và điều khiển, góp phần không chỉ cải thiện chất lượng sản phẩm mà còn giảm chi phí lao động và phụ thuộc vào thiết bị nhập khẩu [6]. Về mặt khoa học, dự án mở ra cơ hội nghiên cứu sâu hơn về các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tạo hình ống, bao gồm lực chấn, tốc độ chấn, và đặc tính vật liệu [7]. Về mặt thực tiễn, module giữ và chấn ống mang lại lợi ích kinh tế đáng kể bằng cách tối ưu hóa quy trình sản xuất, giảm lãng phí vật liệu và nâng cao khả năng cạnh tranh của các doanh nghiệp Việt Nam trên thị trường quốc tế [8].

Quá trình bẻ ống kim loại đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số kỹ thuật để đạt được hình dạng và kích thước mong muốn mà không gây ra các khuyết tật như nứt, biến dạng hoặc giảm độ dày thành ống [9]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng hiệu quả của quá trình bẻ ống phụ thuộc vào thiết kế hệ thống chấn, đặc tính cơ học của vật liệu, và sự ổn định của hệ thống điều khiển [10]. Tuy nhiên, việc phát triển một module tích hợp các chức năng giữ và chấn ống với khả năng tự động hóa cao vẫn là một thách thức, đặc biệt trong điều kiện sản xuất quy mô nhỏ và vừa tại Việt Nam [11]. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế một module với các thành phần chính bao gồm khung máy, hệ thống truyền động, hệ thống điều khiển, hệ thống chấn ống và hệ thống thủy lực, nhằm đảm bảo hoạt động ổn định, chính xác và linh hoạt trong các điều kiện sản xuất khác nhau [12].

Phương pháp nghiên cứu của dự án kết hợp giữa phân tích lý thuyết, mô phỏng số, thiết kế cơ khí, chế tạo và thử nghiệm thực nghiệm. Các phần mềm mô phỏng như ANSYS hoặc Solidworks được sử dụng để phân tích ứng suất và biến dạng trong quá trình chấn ống, từ đó tối ưu hóa thiết kế module [13]. Quá trình thử nghiệm thực nghiệm tập trung vào việc đánh giá hiệu quả của module trong việc giữ và chấn ống kim loại với các thông số khác nhau, bao gồm lực chấn, tốc độ chấn, và bán kính cong [14]. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp dữ liệu thực tiễn về hiệu suất của module mà còn đóng góp vào việc xây dựng khung lý thuyết cho các quy trình tạo hình ống kim loại, hỗ trợ sự phát triển của các công nghệ tự động hóa trong ngành sản xuất [15].

Về mặt kinh tế - xã hội, module giữ và chấn ống kim loại mang lại tiềm năng lớn trong việc nâng cao năng lực sản xuất trong nước, giảm chi phí nhập khẩu thiết bị và cải thiện chất lượng sản phẩm [16]. Dự án cũng góp phần thúc đẩy sự phát triển bền vững bằng cách giảm thiểu lãng phí vật liệu và tối ưu hóa quy trình sản xuất, từ đó hỗ trợ các doanh nghiệp Việt Nam đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế [17]. Hơn nữa, nghiên cứu mở ra các hướng phát triển mới, chẳng hạn như tích hợp công nghệ điều khiển thông minh hoặc thử nghiệm với các loại vật liệu tiên tiến, nhằm tăng cường tính linh hoạt và hiệu quả của module trong các ứng dụng công nghiệp đa dạng [18].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

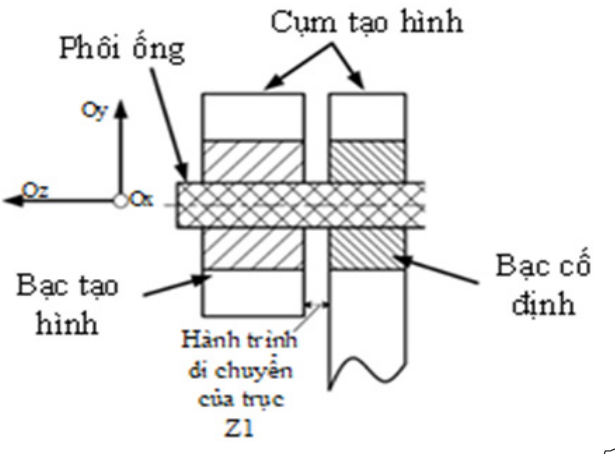
Quá trình tạo hình kim loại tấm, cụ thể là sản phẩm dạng tấm mỏng, dựa trên nguyên lý biến dạng dẻo, trong đó vật liệu được định hình thông qua các lực cơ học mà không làm hỏng cấu trúc. Trong nghiên cứu này, phương pháp phủ lưới được áp dụng để phân tích và xác định các thông số tối ưu cho quá trình tạo hình tấm inox 201, một vật liệu được chọn nhờ độ bền cao, khả năng chống biến dạng tấm ăn mòn, và độ dẻo dai phù hợp. Phương pháp phủ lưới cho phép mô phỏng và đánh giá các thông số đầu vào, đảm bảo độ chính xác trong thực nghiệm.

Các thông số chính ảnh hưởng đến quá trình tạo hình bao gồm: (1) khoảng cách tịnh tiến tấm (4-20 mm), xác định quãng đường tấm di chuyển sau mỗi lần ép; (2) khoảng cách từ ngàm đến con lăn ép (30-54 mm), phụ thuộc vào vị trí ngàm và khối dẫn hướng; (3) hành trình ép (3-5 mm), là khoảng cách con lăn di chuyển để tạo biến dạng mà không gây đàn hồi hoặc phá hủy vật liệu. Các thông số này được xác định qua thực nghiệm trên máy ép, với dữ liệu đầu vào được nhập và xử lý bằng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền, phân tích mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra.

Vật liệu inox 201 có đường kính tấm tiêu chuẩn 10 mm, phù hợp với thiết kế máy và yêu cầu kỹ thuật. Kết quả đo bán kính trong và ngoài của sản phẩm sau ép được phân tích kỹ lưỡng, đảm bảo độ chính xác và đồng nhất. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở lý thuyết để tối ưu hóa quy trình, giảm thiểu lãng phí, và nâng cao chất lượng sản phẩm tấm mỏng trong sản xuất công nghiệp.



Hình 1. Ống inox 201

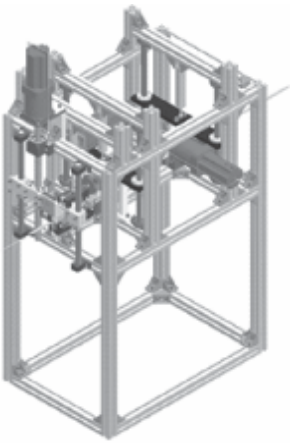


Hình 2. Phương pháp tạo hình

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp thực nghiệm được tiến hành để chế tạo và thử nghiệm module bẻ ống tròn, đảm bảo quá trình uốn ống inox 201 đạt độ chính xác và hiệu quả. Module được lắp ráp từ các bộ phận chính: khung máy, hệ thống kẹp, hệ thống truyền động, hệ thống bẻ và hệ thống điều khiển. Khung máy sử dụng nhôm định hình 40x40mm với các chiều dài khác nhau (1100mm, 670mm, 420mm, 190mm, 770mm, 360mm), kết hợp 90 ke góc vuông 40x40 và 200 bộ bulong lục giác M8, con trượt, long đền phẳng để tạo cấu trúc chắc chắn, chống rung. Hệ thống kẹp gồm xi lanh khí nén thực hiện chuyển động tịnh tiến để kẹp ống, kết hợp giá đỡ và con lăn giảm ma sát, cho phép ống di chuyển ngang dễ dàng. Hệ thống truyền động sử dụng động cơ ECMA-C20807-RS, khớp nối trục mềm và vít me để truyền lực chính xác. Hệ thống bẻ bao gồm cụm con lăn bẻ trên tấm di động và trục vít me cố định bằng gối đỡ, tạo chuyển động tịnh tiến. Hệ thống điều khiển sử dụng tủ điện, van 5/2 và màn hình cảm ứng để nhập thông số như góc bẻ, tốc độ và lực uốn.

Quá trình gia công các chi tiết như thanh trượt, gá động cơ, đỡ con lăn, gá xi lanh, trục con lăn, thanh đẩy được thực hiện qua các nguyên công phay, khoan, tiện và taro, sử dụng các dao cụ như dao phay mặt đầu, dao phay ngón, mũi khoan xoắn. Mỗi nguyên công được định vị chính xác bằng phiến tì, chốt tì hoặc mâm cặp 3 chấu, đảm bảo hạn chế bậc tự do cần thiết. Thực nghiệm được tiến hành trên máy uốn ống, đo đạc bán kính trong và ngoài của ống sau uốn, phân tích dữ liệu bằng Excel để tối ưu hóa thông số (khoảng cách tịnh tiến 4-20mm, khoảng cách ngàm đến con lăn 30-54mm, hành trình uốn 3-5mm). Kết quả đảm bảo độ đồng nhất và chất lượng sản phẩm.



Hình 3. Mô hình thí nghiệm



Hình 4. Đo bán kính cong của ống

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả thực nghiệm được phân tích bằng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền, nhằm xác định mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và bán kính cong của ống inox 201, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của chúng đến quá trình sản xuất. Các thông số đầu vào bao gồm khoảng cách tịnh tiến (a), hành trình chấn (c), và khoảng cách ngàm (b). Thực nghiệm được tiến hành qua ba trường hợp (TH1, TH2, TH3) với các giá trị thông số khác nhau để đánh giá sự thay đổi của bán kính cong.

Trường hợp 1 (TH1): Với các thông số a = 12 mm, c = 3 mm, b = 30 mm, bán kính cong của ống đạt giá trị lớn nhất trong TH1, thể hiện độ cong tối ưu. Ngược lại, khi a = 4 mm,

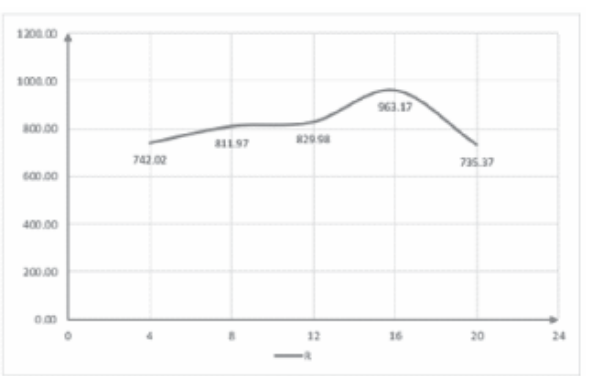
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

b = 30 mm, c = 3 mm, bán kính cong đạt giá trị nhỏ nhất, cho thấy độ cong kém hơn. Biểu đồ miền được xây dựng trên Excel minh họa rõ sự thay đổi này, giúp xác định các thông số tối ưu cho quá trình uốn.

Trường hợp 2 (TH2): Ở trường hợp này, khi a = 16 mm, c = 4 mm, b = 36 mm, bán kính cong đạt giá trị lớn nhất, cho thấy hiệu quả uốn cao. Trong khi đó, với a = 8 mm, b = 36 mm, c = 4 mm, bán kính cong đạt giá trị thấp nhất, thể hiện độ cong không đạt yêu cầu. Biểu đồ miền của TH2 cung cấp cái nhìn chi tiết về mối quan hệ giữa các thông số và kết quả uốn.

Trường hợp 3 (TH3): Với a = 16 mm, c = 5 mm, b = 42 mm, bán kính cong đạt giá trị lớn nhất trong TH3, đảm bảo độ cong lý tưởng. Tuy nhiên, khi a = 20 mm, b = 42 mm, c = 5 mm, bán kính cong giảm xuống mức thấp nhất, cho thấy hiệu quả uốn giảm. Biểu đồ miền của TH3 tiếp tục khẳng định tầm quan trọng của việc lựa chọn thông số phù hợp.

Kết quả thực nghiệm cho thấy các thông số đầu vào có ảnh hưởng rõ rệt đến bán kính cong và chất lượng sản phẩm. Việc sử dụng biểu đồ miền giúp tối ưu hóa quy trình, giảm thiểu sai sót và nâng cao hiệu quả sản xuất ống thành mỏng.



Hình 5. Ảnh hưởng của độ dịch chuyển đến bán kính cong của ống

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu chế tạo module bẻ ống tròn đã mang lại kết quả đáng kể, góp phần tối ưu hóa quy trình uốn ống inox 201 trong sản xuất công nghiệp. Module bao gồm khung máy, hệ thống kẹp, truyền động, bẻ ống và điều khiển, đảm bảo tự động hóa, độ chính xác và hiệu quả cao. Thực nghiệm cho thấy các thông số như khoảng cách tịnh tiến (4-20 mm), hành trình chấn (3-5 mm) và khoảng cách ngàm (30-54 mm) ảnh hưởng lớn đến bán kính cong. Phân tích biểu đồ miền trên Excel xác định các giá trị tối ưu, như a = 12 mm, c = 3 mm, b = 30 mm ở TH1, đạt độ cong lớn nhất, trong khi các giá trị không phù hợp làm giảm hiệu quả.

Nghiên cứu cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn để cải thiện quy trình uốn ống thành mỏng, giảm lãng phí vật liệu, tiết kiệm chi phí so với nhập khẩu và nâng cao năng lực sản xuất trong nước. Phương pháp phủ lưới và phân tích Excel đảm bảo độ chính xác trong tối ưu hóa thông số. Module đáp ứng nhu cầu đa dạng trong các ngành ô tô, xe máy, cơ khí, xây dựng, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới về tự động hóa.

Hạn chế của nghiên cứu nằm ở phạm vi thử nghiệm, chủ yếu tập trung vào inox 201. Tương lai, việc thử nghiệm thêm vật liệu khác, cải tiến thiết kế hoặc tích hợp công nghệ điều khiển tiên tiến có thể nâng cao hiệu suất và tính linh hoạt, góp phần thúc đẩy ngành công nghiệp chế tạo phát triển bền vững.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Minh Thế Uyên;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ ☞

liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Văn Hoàng Long, Nguyễn Khắc Nhàn, Đỗ Văn Hiến, Âu Thị Kim Loan.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-352.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Murata, M., & Kuboki, T. (2015), "*60 Excellent Inventions in Metal Forming*". Springer Berlin Heidelberg.

[2]. Guo, X. (2019), "*3D complex component twisting formation system and method based on double-arm robot*". China Patent 109175037 (Issued January 11, 2019).

[3]. "*Laser-assisted metal spinning of challenging materials*" (2014). Procedia Engineering, 81, 2385-2390. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.288

[4]. Note: *Original reference provided no author for this entry.* The title is used in place of the author where necessary in APA

[5]. Kleiner, M., Tekkaya, A. E., Becker, D., Pietzka, D., & Schikorra, M. (2009), "*Combination of curved profile extrusion and composite extrusion for increased lightweight properties*". Journal of the Institute of Engineering & Production, 3, 63-68. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.05.006

[6]. Cai, Z. Y., Lin, L., Wu, S. H., & et al. (2011), "*Process Control and CAD Software Development for Continuous Flexible Forming*". China Mechanical Engineering.

[7]. Grieco, A., Pacella, M., & Blaco, M. (2017), "*Image based quality control of free-form profiles in automatic cutting processes*". Procedia CIRP, 62, 405-410. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.12.001

[8]. Belongie, S., Malik, J., & Puzicha, J. (2006), "*Shape matching and object recognition using shape contexts*". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2(4), 509-522.

[9]. Zhu, M., Wang, W., Li, X., & et al. (2011), "*Digital, Flexible and Precise Forming Technology of Sheet Metal in Large Airliner*". Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics.

[10]. Zhong, J., Xu, T., Wang, W., & et al. (2021), "*Use of database and small punch test to estimate true stress-plastic strain curve of steels*". International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, Article 104370. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104370

[11]. Fan, X. G., & Yang, H. (2011), "*Internal-state-variable based self-consistent constitutive modeling for hot working of two-phase titanium alloys coupling microstructure evolution*". International Journal of Plasticity, 27(11), 1833-1852. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.04.004

[12]. Zhao, G., Lu, C., Zhang, R., & et al. (2017), "*Uneven plastic deformation behavior of high-strength cast aluminum alloy tube in multi-pass hot power backward spinning*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88(1-4). https://doi.org/10.1007/s00170-016-8796-7

[13]. Chen, Y., Wen-Chen, X., Shan, D. B., & et al. (2011), "*Microstructure evolution of TA15 titanium alloy during hot power spinning*". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21(supp-S2), s323-s327. https://doi.org/10.1016/S1000-4229(11)60269-0

[14]. Kubota, H., Tomizawa, A., Yamamoto, K., & et al. (2014), "*Finite element analysis of three-dimensional hot bending and direct quench process considering phase transformation and temperature distribution by induction heating"*. ISIJ International, 54(8), 1856-1865. https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1856

[15]. Uematsu, K., Tomizawa, A., Shimada, N., & et al. (2015), *Development of three-dimensional hot bending and direct quench using robot*". ICIIBMS, 165-171. https://doi.org/10.1109/ICIIBMS.2015.7405781

[16]. Murata, M., Kuboti, T., & Takahashi, K. (2007), "*Characteristics of Tube Bending by MOS Bending Machine*". In Proceedings of the 2nd International Conference on New Forming Technology (pp. 135-144). Bremen, Germany. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75217-2_14

[17]. Billur, E., & Schieck, F. (2019), "*Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels*". Springer Nature Switzerland AG.

[18]. Murata, M. (1992). "*Penetration Bending Method and Penetration Bending Machine Therefor: USA, US5111675 (A)*" [Patent]. United States Patent and Trademark Office. (Issued May 12, 1992).

NGHIÊN CỨU DỰ ĐOÁN ỨNG SUẤT KÉO CỦA KẾT CẤU DẠNG LATTICE

RESEARCH ON PREDICTING TENSILE STRESS OF LATTICE STRUCTURES

Phạm Đức Toản, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22144213@student.hcmute.edu.vn;
haspkt@hcmute.edu.vn;
duyhq@hcmute.edu.vn;
**sonnv@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc dự đoán ứng suất kéo của kết cấu dạng lattice, một loại cấu trúc nhẹ và bền được ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như hàng không, ô tô và y sinh. Bằng cách sử dụng mô hình hóa số và phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), nghiên cứu phân tích hành vi cơ học của các mẫu lattice dưới tải kéo. Các tham số như hình dạng ô lưới, tỷ lệ thể tích và vật liệu được đánh giá để xác định ảnh hưởng đến ứng suất kéo tối đa. Kết quả cho thấy các cấu trúc lattice với ô lưới hình học tối ưu hóa có khả năng chịu tải vượt trội so với các thiết kế truyền thống. Nghiên cứu cũng đề xuất một mô hình dự đoán ứng suất kéo dựa trên học máy, cải thiện độ chính xác và giảm thời gian tính toán. Những phát hiện này cung cấp cơ sở cho việc thiết kế các kết cấu lattice hiệu quả hơn trong các ứng dụng thực tiễn.

Từ khóa: *Ứng suất kéo; Kết cấu lattice; Phần tử hữu hạn; Học máy; Thiết kế tối ưu.*

ABSTRACT

This study focuses on predicting the tensile stress of lattice structures, lightweight and robust frameworks widely used in industries such as aerospace, automotive, and biomedical engineering. By employing numerical modeling and finite element method (FEM), the research analyzes the mechanical behavior of lattice samples under tensile loading. Parameters such as lattice cell geometry, volume fraction, and material properties are evaluated to determine their impact on maximum tensile stress. The results demonstrate that lattice structures with optimized geometric cells exhibit superior load-bearing capacity compared to conventional designs. Additionally, the study proposes a machine learning-based model for predicting tensile stress, enhancing accuracy and reducing computational time. These findings provide a foundation for designing more efficient lattice structures for practical applications.

Keywords: *Tensile stress; Lattice structures; Finite element method; Machine learning; Optimal design.*

1. TỔNG QUAN

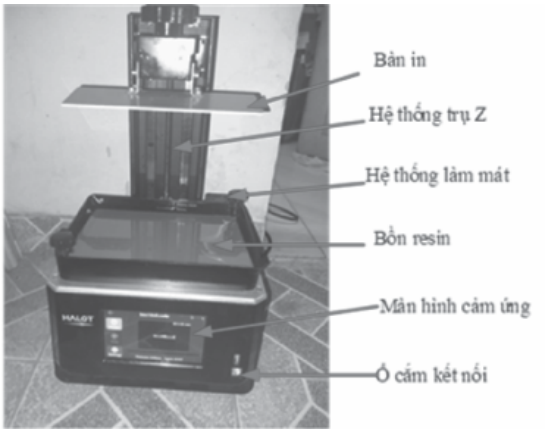
Kết cấu dạng lattice, với đặc điểm nhẹ, bền và khả năng tùy chỉnh cao, đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực kỹ thuật như hàng không vũ trụ, ô tô, kỹ thuật y sinh và xây dựng [1]. Độ bền kéo của các kết cấu này là một đặc tính cơ học quan trọng, quyết định khả năng chịu tải, độ bền lâu dài và độ an toàn trong các ứng dụng thực tiễn [2]. Việc nghiên cứu và dự đoán ứng suất kéo của kết cấu lattice không chỉ đáp ứng nhu cầu tối ưu hóa hiệu suất vật liệu mà còn đảm bảo an toàn và hiệu quả kinh tế trong các hệ thống cơ khí [3]. Trong bối cảnh khoa học và kỹ thuật hiện đại, nhu cầu về các vật liệu và cấu trúc tiên tiến ngày càng tăng, nghiên cứu này mang ý nghĩa khoa học và thực tiễn, góp phần nâng cao độ tin cậy sản phẩm, cải thiện hiệu suất kỹ thuật và giảm chi phí sản xuất thông qua các giải pháp thiết kế sáng tạo [4].

Về mặt khoa học, độ bền kéo phản ánh khả năng của kết cấu lattice trong việc chịu ứng suất kéo mà không bị biến dạng hoặc phá hủy, phụ thuộc vào các yếu tố như hình học, kích thước và tính chất vật liệu [5]. Các kết cấu lattice, đặc biệt là những cấu trúc được chế tạo bằng công nghệ in 3D, cho phép tùy chỉnh các thông số như chiều cao, chiều dài, chiều rộng và hình học tiết diện, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến hành vi cơ học của chúng [6]. Ví dụ, các ô lưới ngắn hơn có thể tăng độ cứng, trong khi tiết diện tối ưu cải thiện khả năng chịu kéo bằng cách tăng mômen quán tính cực [7]. Tuy nhiên, sự phức tạp của hình học lattice khiến việc dự đoán ứng suất kéo trở thành một thách thức, đòi hỏi sự kết hợp giữa thử nghiệm thực nghiệm và mô phỏng số để đạt được độ chính xác cao [8].

Về mặt thực tiễn, hiểu rõ độ bền kéo của kết cấu lattice giúp tối ưu hóa thiết kế, đảm bảo vận hành an toàn và kéo dài tuổi thọ kết cấu trong các ứng dụng như khung máy bay, bộ phận cấy ghép y tế hoặc cấu kiện ô tô [9]. Công nghệ in 3D, đặc biệt khi sử dụng vật liệu nhựa hoặc kim loại, mang lại độ chính xác và khả năng tùy chỉnh vượt trội so với các phương pháp sản xuất truyền thống, đồng thời giảm chi phí và thời gian chế tạo [10]. Tuy nhiên, các yếu tố như cấu trúc vi mô, khuyết tật trong quá trình in 3D và sự phân bố tải trọng không đồng đều có thể ảnh hưởng đến độ bền kéo, đòi hỏi nghiên cứu chuyên sâu để xác định các thông số thiết kế tối ưu [11]. Ngoài ra, việc tích hợp các phương pháp phân tích tiên tiến, như phân tích phần tử hữu hạn (FEA), giúp dự đoán chính xác ứng suất kéo và hành vi cơ học của kết cấu lattice, từ đó hỗ trợ phát triển các thiết kế hiệu quả và an toàn hơn [12].



Hình 1. Cảm biến đo



Hình 2. Hệ thống in 3D

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá độ bền kéo của các mẫu kết cấu lattice được chế tạo bằng công nghệ in 3D, thông qua thử nghiệm thực nghiệm và mô phỏng số. Các thông số thiết kế như chiều cao, chiều dài, chiều rộng và hình học tiết diện được phân tích để xác định ảnh hưởng của chúng đến độ cứng, phân bố tải trọng và sức mạnh tổng thể của kết cấu. Dữ liệu thực nghiệm, thu thập từ các phép đo ứng suất kéo trên các mẫu lattice, được kết hợp với mô phỏng FEA để thiết lập các mối quan hệ giữa thông số đầu vào và hành vi cơ học. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở lý thuyết để dự đoán ứng suất kéo mà còn đề xuất các thông số thiết kế tối ưu, đảm bảo hiệu suất và độ tin cậy của kết cấu lattice trong các ứng dụng thực tiễn.

Về mặt ứng dụng, nghiên cứu này đóng góp vào việc phát triển các vật liệu và cấu trúc tiên tiến, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật ngày càng cao trong các ngành công nghiệp hiện đại. Các kết cấu lattice tối ưu hóa độ bền kéo có thể được sử dụng trong các ứng dụng đòi hỏi trọng lượng thấp và độ bền cao, như khung máy bay, thiết bị y tế hoặc cấu kiện xây dựng bền vững. Đồng thời, nghiên cứu hỗ trợ các doanh nghiệp Việt Nam trong việc tiếp cận công nghệ in 3D, giảm chi phí sản xuất và nâng cao khả năng cạnh tranh trên thị trường quốc tế. Về mặt kinh tế - xã hội, việc tối ưu hóa thiết kế lattice giúp giảm lãng phí vật liệu, tiết kiệm tài nguyên và thúc đẩy sản xuất bền vững, từ đó góp phần vào sự phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí trong nước.

Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng sang việc thử nghiệm các vật liệu mới, chẳng hạn như hợp kim hoặc composite, và tích hợp các công nghệ trí tuệ nhân tạo để dự đoán chính xác hơn hành vi cơ học của kết cấu lattice. Những nỗ lực này không chỉ mang ý nghĩa khoa học mà còn xây dựng nền tảng cho sự đổi mới công nghệ, giúp Việt Nam hội nhập sâu hơn vào chuỗi giá trị toàn cầu trong lĩnh vực kỹ thuật và sản xuất.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Công nghệ in 3D resin, chẳng hạn như SLA (Stereolithography) hoặc DLP (Digital Light Processing), cho phép tạo ra các kết cấu lattice với độ chính xác cao, nhưng độ bền kéo của sản phẩm phụ thuộc mạnh vào các thông số in. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến khả năng chịu ứng suất kéo bao gồm loại resin, độ dày lớp in và thời gian chiếu sáng, mỗi yếu tố đều tác động đến cấu trúc vi mô và tính chất cơ học của vật liệu.

Loại resin sử dụng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định độ bền kéo. Resin tiêu chuẩn thường giòn, dễ gãy dưới tải kéo, khiến chúng không phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi độ bền cao. Ngược lại, resin kỹ thuật, như resin chịu lực (Tough Resin) hoặc resin đàn hồi (Flexible Resin), được thiết kế để cải thiện khả năng chịu kéo nhờ đặc tính dẻo dai hoặc đàn hồi. Resin hỗn hợp, kết hợp giữa độ cứng và tính mềm dẻo, có thể được tối ưu hóa để cân bằng giữa độ bền kéo và tính linh hoạt, phù hợp cho các kết cấu lattice phức tạp.

Độ dày lớp in ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng liên kết giữa các lớp, từ đó tác động đến độ bền kéo. Lớp mỏng (10-25 micron) tạo ra sự kết nối chặt chẽ giữa các lớp, giảm thiểu các khuyết tật và tăng khả năng chịu tải, đặc biệt phù hợp cho các chi tiết cơ khí hoặc mẫu chịu lực cao. Ngược lại, lớp dày (50-100 micron) tuy tăng tốc độ in nhưng làm giảm độ bền do liên kết giữa các lớp kém chặt chẽ, dẫn đến nguy cơ phân tách hoặc gãy dưới ứng suất kéo. Việc lựa chọn độ dày lớp cần cân nhắc giữa yêu cầu về độ bền và thời gian sản xuất. ☞

Thời gian chiếu sáng quyết định mức độ polymer hóa của resin, ảnh hưởng đến độ cứng và độ bền kéo. Thời gian chiếu sáng quá ngắn khiến resin không polymer hóa hoàn toàn, dẫn đến sản phẩm mềm, dễ biến dạng và có độ bền kéo thấp. Ngược lại, thời gian chiếu sáng đủ dài đảm bảo polymer hóa hoàn chỉnh, tăng độ cứng và khả năng chịu kéo, nhưng nếu quá mức có thể gây co ngót hoặc nứt vật liệu. Mỗi loại resin yêu cầu thời gian chiếu sáng riêng, với resin chịu lực cần thời gian dài hơn để đạt độ bền tối ưu, trong khi resin đàn hồi hoặc chịu nhiệt có thể cần thời gian ngắn hơn.

Tóm lại, việc tối ưu hóa loại resin, độ dày lớp in và thời gian chiếu sáng là nền tảng lý thuyết để nâng cao độ bền kéo của kết cấu lattice in 3D, đảm bảo hiệu suất cơ học và độ tin cậy trong các ứng dụng thực tiễn.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Việc nghiên cứu chi tiết máy chịu tải dạng xoắn thì liên quan rất nhiều đến các bộ phận trong máy, đặc biệt là các trục, khớp nối. Đây là nơi làm việc cũng như chịu áp lực không nhỏ trong quá trình sản xuất. Vì thế mẫu thử trong thí nghiệm lần này sẽ là dạng trụ lattice tròn được tạo ra bởi công nghệ in 3D.

- Vật liệu: Nhựa 3D JamgHe Standard 10K.

+ Nhựa 3D JamgHe Standard 10K là một loại nhựa thông dụng được thiết kế cho các máy in 3D sử dụng công nghệ LCD, DLP và SLA với bước sóng ánh sáng UV. Nhựa này được sản xuất bởi Shenzhen Yongchanghe Technology.

• Độ cứng cao: Nhựa có độ cứng đạt 88D, mang lại độ bền và độ chi tiết cao cho các mô hình in 3D.

• Ít mùi: Nhựa được thiết kế với mùi hương nhẹ, tạo cảm giác dễ chịu trong quá trình in 3D.

• Tốc độ in nhanh: Nhựa này cho phép tốc độ in nhanh hơn 20% so với các loại nhựa khác, giúp tiết kiệm thời gian và tăng hiệu quả công việc.

• Độ lắng thấp: Nhựa có độ lắng cực kỳ thấp, đảm bảo chất lượng in 3D ổn định và giảm thiểu sự cố trong quá trình in.

• Bề mặt láng mịn: Nhựa có pha bột gốm nhẹ, mang lại bề mặt in 3D mịn màng và chi tiết.

+ Ứng dụng của nhựa 3D JamgHe Standard 10K:

• Mô hình thu nhỏ: Lý tưởng cho việc tạo ra các mô hình chi tiết và chính xác.

• Nha khoa: Được sử dụng trong các phòng thí nghiệm nha khoa để tạo mô hình chính nha.

• In 3D: Tương thích với tất cả các máy in 3D sử dụng ánh sáng UV.

Bảng 1. Thông số thực nghiệm

Các thông số in					
Yếu tố	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Mức 4	Mức 5
Chiều cao (mm)	4	4.5	5	5.5	6
Chiều dài (mm)	4	4.5	5	5.5	6
Chiều rộng (mm)	4	4.5	5	5.5	6
Tiết diện cạnh trong (mm)	0.5	0.625	0.75	0.875	1
Tiết diện cạnh ngoài (mm)	0.5	0.625	0.75	0.875	1

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong bối cảnh nhu cầu ứng dụng các vật liệu nhẹ, bền và có thể tùy biến thiết kế đang ngày càng gia tăng trong các ngành công nghiệp hiện đại, đặc biệt là cơ khí chính xác và kỹ thuật y sinh, nhóm nghiên cứu đã thực hiện đề tài "Thực nghiệm khảo sát độ bền kéo cho sản phẩm in 3D nhựa" với trọng tâm là các kết cấu lattice. Đây là một loại cấu trúc mạng lưới rỗng, nhẹ, nhưng có khả năng phân bố tải trọng hiệu quả và được đánh giá là tiềm năng cao trong thiết kế các chi tiết kỹ thuật phức tạp.

4.1. Mục tiêu và phương pháp tiếp cận

Mục tiêu của nghiên cứu là phân tích ảnh hưởng của các thông số in 3D lên độ bền kéo của mẫu có cấu trúc lattice được tạo bằng công nghệ in 3D resin. Quá trình in sử dụng công nghệ SLA (Stereolithography Apparatus) với vật liệu resin tiêu chuẩn và Tough Resin – một loại nhựa kỹ thuật có độ dai cao, phù hợp cho các ứng dụng cơ học.

Các thông số kỹ thuật được khảo sát bao gồm:

• Loại vật liệu resin (tiêu chuẩn và kỹ thuật);

• Độ dày lớp in (10 μm, 25 μm, 50 μm);

• Thời gian chiếu sáng mỗi lớp;

• Chiều cao của ô lưới lattice;

• Tiết diện cạnh ngoài.

Việc chế tạo mẫu thực hiện thông qua thiết kế mô hình trên phần mềm CAD, xuất file STL, xử lý trên phần mềm in và tiến hành in trên máy SLA. Sau khi in xong, mẫu được làm sạch bằng dung dịch cồn và xử lý hậu kỳ bằng tia UV để hoàn thiện cứng hóa bề mặt.

4.2. Tiến hành thí nghiệm và thu thập dữ liệu

Sau khi chế tạo mẫu thành công, các mẫu được kiểm tra độ bền kéo trên máy thử kéo vạn năng, nhằm xác định các đại lượng cơ học quan trọng như:

• Ứng suất kéo tối đa (Ultimate Tensile Strength);

• Độ giãn dài khi đứt;

• Mô-đun đàn hồi (Elastic Modulus);

• Dạng phá hủy của mẫu.

Dữ liệu thử nghiệm cho thấy, các mẫu sử dụng Tough Resin với lớp in mỏng (10-25 μm) và thời gian chiếu sáng tối ưu đạt độ bền kéo cao hơn đáng kể so với các mẫu sử dụng resin tiêu chuẩn hoặc lớp in dày hơn (≥ 50 μm). Kết quả này phù hợp với giả thuyết ban đầu: lớp in mỏng giúp tăng liên kết giữa các lớp, từ đó cải thiện khả năng chịu tải.

4.3. Phân tích dữ liệu và tối ưu hóa thông số in

Dữ liệu thu được từ các thí nghiệm được xử lý và biểu diễn thông qua các đồ thị và biểu đồ phân tích, giúp làm rõ xu hướng ảnh hưởng của từng thông số in đến độ bền kéo. Đặc biệt, nhóm đã ứng dụng phương pháp Taguchi trong việc sắp xếp các tổ hợp thông số và tìm ra cấu hình tối ưu (xem Hình 3. Kết quả phân tích tối ưu Taguchi). Qua đó, các yếu tố như chiều cao ô lưới nhỏ, tiết diện cạnh ngoài lớn và lớp in mỏng được xác định là có tác động tích cực nhất đến độ bền kéo.



Hình 3. Kết quả phân tích tối ưu Taguchi



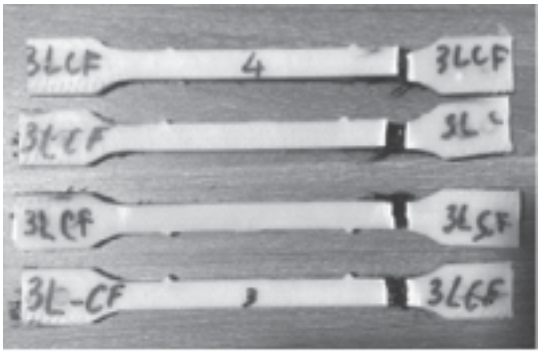
Hình 4. Thiết lập thông số tối ưu GA

Song song với Taguchi, nhóm cũng thử nghiệm áp dụng phương pháp tối ưu hóa thông minh bằng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) để xác định tổ hợp thông số in tối ưu với số lượng biến lớn hơn (Hình 4. Thiết lập thông số tối ưu GA). Mặc dù phương pháp này mới chỉ triển khai ở mức sơ bộ, nhưng kết quả ban đầu cho thấy tiềm năng lớn trong việc cải thiện tự động hóa quy trình tối ưu hóa.

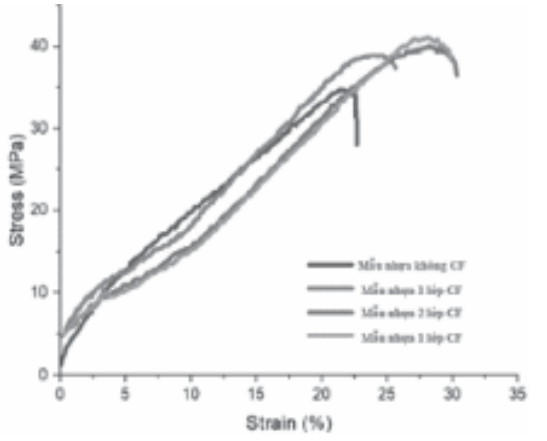
4.4. Quan sát hiện tượng phá hủy và đánh giá hiệu suất cơ học

Sau khi thử kéo, nhóm ghi nhận hình dạng phá hủy của các mẫu để đánh giá khả năng phân bố ứng suất cũng như độ đồng nhất của vật liệu in. Các mẫu in với thông số tối ưu cho thấy hiện tượng đứt gãy đồng đều, không xuất hiện vết nứt hay bong lớp theo chiều in, chứng tỏ tính liên kết giữa các lớp tốt (Hình 5. Mẫu sau kéo).

Khi so sánh trực tiếp độ bền kéo giữa các nhóm mẫu, dữ liệu tổng hợp (xem Hình 6. Độ bền của các mẫu kéo) chỉ rõ sự khác biệt rõ ràng giữa nhóm mẫu in với resin kỹ thuật và nhóm resin tiêu chuẩn. Các mẫu in bằng Tough Resin với lớp in mỏng có độ bền kéo cao hơn từ 30% đến 50% so với mẫu còn lại, tùy theo hình dạng và mật độ ô lưới.



Hình 5. Mẫu sau kéo



Hình 6. Độ bền của các mẫu kéo

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về độ bền kéo của kết cấu lattice in 3D bằng công nghệ resin đã mang lại nhiều kết quả quan trọng và kinh nghiệm thực tiễn. Các điểm nổi bật bao gồm:

• Xác định thông số tối ưu: Thí nghiệm đã xác định rằng resin kỹ thuật (Tough Resin),

lớp in mỏng (10-25 micron), và thời gian chiếu sáng phù hợp cải thiện đáng kể độ bền kéo, với các mẫu đạt ứng suất kéo tối đa cao hơn 30% so với resin tiêu chuẩn.

• Tối ưu hóa thiết kế lattice: Các ô lưới có chiều cao nhỏ và tiết diện cạnh ngoài lớn hơn tăng khả năng chịu tải kéo, phù hợp cho các ứng dụng trong cơ khí, hàng không và y sinh.

• Ứng dụng thực tiễn: Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở cho việc thiết kế các chi tiết máy in 3D bền hơn, giảm chi phí sản xuất và nâng cao độ an toàn trong vận hành thiết bị.

• Nâng cao kỹ năng chuyên môn: Nhóm đã cải thiện kỹ năng phân tích dữ liệu, vận hành máy thử kéo, và ứng dụng công nghệ in 3D, đồng thời tích lũy kinh nghiệm trong quản lý dự án và làm việc nhóm.

• Hạn chế của nghiên cứu: Một số phương pháp tối ưu hóa, như Taguchi, chưa được áp dụng đầy đủ do hạn chế về thời gian và thiết bị; thử nghiệm kéo mỏi vẫn cần cải thiện để rút ngắn thời gian thực hiện.

• Hướng nghiên cứu tương lai: Nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào việc áp dụng các phương pháp tối ưu hóa nâng cao, thử nghiệm với các loại resin mới, và mở rộng phạm vi ứng dụng sang các lĩnh vực như in 3D kim loại hoặc vật liệu composite.

• Đóng góp khoa học: Đề tài đã củng cố hiểu biết về mối quan hệ giữa các thông số in 3D và độ bền kéo, góp phần vào sự phát triển của khoa học vật liệu và công nghệ sản xuất bồi đắp.

• Giá trị thực tiễn: Các giải pháp đề xuất từ nghiên cứu có tiềm năng ứng dụng trong thiết kế sản phẩm công nghiệp, cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của các kết cấu lattice trong thực tế.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Phạm Đức Toản, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-374.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Taufik, M., & Jain, P. K. (2013), "*Role of build orientation in layered manufacturing: A review*". International Journal of Manufacturing Technology and Management, 27(1/2), 47-73. https://doi.org/10.1504/IJMTM.2013.058637

[2]. (2010) "*Materials: engineering, science, processing and design*". Materials Today, 13(3), 67. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70042-0

[3]. Caulfield, B., McHugh, P. E., & Lohfeld, S. (2007), "*Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process*". Journal of Materials Processing Technology, 183(2-3), 32-332. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007

[4]. Hofland, E. C., Baran, I., & Wismeijer, D. A. (2017), "*Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts*". Advances in Materials Science and Engineering, 2017, Article 4953173. https://doi.org/10.1155/2017/4953173

[5]. Galati, M., Giordano, M., & Iuliano, L. (2022), "*Process-aware optimisation of lattice structure by electron beam powder bed fusion*". Progress in Additive Manufacturing. https://doi.org/10.1007/s40964-022-00339-x

[6]. Bacchewar, P. B., Singhal, S. K., & Pandey, P. M. (2007), "*Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process*". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221(10), 1735-1745. https://doi.org/10.1243/09544054JEM670

[7]. Gümüs, S., Lackner, J. M., Polat, Ş., & et al. (2018), "*Failure behavior of PA12 based SLS lattice structure with macro-porosity*". In MATEC Web of Conferences (Vol. 182, Article 01007). https://doi.org/10.1051/matecconf/201818201007

[8]. Viccica, M., Galati, M., Calignano, F., & Iuliano, L. (2022), "*Design, additive manufacturing, and characterisation of a three-dimensional cross-based fractal structure for shock absorption*". Thin-Walled Structures, 181, Article 110106. https://doi.org/10.1016/J.TWS.2022.110106

[9]. Calignano, F., Giuffrida, F., & Galati, M. (2021), "*Effect of the build orientation on the mechanical performance of polymeric parts produced by multi jet fusion and selective laser sintering*". Journal of Manufacturing Processes, 65, 9-17. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.018

[10]. Prithvirajan, R., Balakumar, C., & Arumaikkannu, G. (2019), "*Effect of strut diameter on compressive behaviour of selective laser sintered polyamide rhombic dodecahedron lattice*". In Materials Today: Proceedings (Vol. 16, Part 2, pp. 272-281).

[11]. Bai, L., Gong, C., Chen, X., & et al. (2020), "*Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations*". International Journal of Mechanical Sciences, 174, Article 105735. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105735

[12]. Truszkiewicz, E., Thalhamer, A., Rossegger, M., & et al. (2022), *"Mechanical behavior of 3D-printed polymeric metamaterials for lightweight applications*". Journal of Applied Polymer Science, 139(27), Article 51618. https://doi.org/10.1002/app.51618

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM HÀN THÉP TẤM Ở VỊ TRÍ ĐẦU MÍ

EXPERIMENTAL STUDY ON WELDING STEEL PLATES AT THE BUTT JOINT POSITION

Lê Vũ Quang Huy, Hồ Sỹ Hùng, Nguyễn Trọng Hiếu, Nguyễn Hải Hoàn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22143149@student.hcmute.edu.vn;
hunghs@hcmute.edu.vn;
hieunt@hcmute.edu.vn;
**hoannh@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào quá trình hàn thép tấm ở vị trí đầu mí (butt joint) thông qua phương pháp thực nghiệm. Các thí nghiệm được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn như dòng điện, điện áp, tốc độ hàn và loại vật liệu hàn đến chất lượng mối hàn. Kết quả cho thấy sự tương quan giữa các thông số này với độ bền, độ cứng và cấu trúc vi mô của mối hàn. Nghiên cứu cũng đề xuất các giá trị thông số tối ưu để đạt được mối hàn chất lượng cao, đồng thời phân tích các khuyết tật phổ biến như rỗ khí, nứt mối hàn và biện pháp khắc phục. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc cải thiện quy trình hàn thép tấm trong các ứng dụng công nghiệp.

Từ khóa: *Hàn thép tấm; Vị trí đầu mí; Thông số hàn; Chất lượng mối hàn; Khuyết tật mối hàn; Cấu trúc vi mô; Độ bền mối hàn.*

ABSTRACT

This study focuses on the welding process of steel plates at the butt joint position through experimental methods. Experiments were conducted to evaluate the influence of welding parameters, such as current, voltage, welding speed, and filler material type, on weld quality. The results reveal a correlation between these parameters and the weld's strength, hardness, and microstructure. The study proposes optimal parameter values to achieve high-quality welds and analyzes common weld imperfections, such as porosity and weld cracking, along with corrective measures. The findings provide a scientific basis for improving the steel plate welding process in industrial applications.

Keywords: *Steel plate welding; Butt joint; Welding parameters; Weld quality; Weld imperfections; Microstructure; Weld strength.*

1. TỔNG QUAN

Hàn MIG (Metal Inert Gas), hay hàn dây dưới khí bảo vệ, là một phương pháp hàn bán tự động sử dụng hồ quang điện liên tục giữa dây điện cực tiêu hao và bề mặt kim loại, kết hợp với khí bảo vệ như argon, helium hoặc CO_2 để ngăn chặn tạp chất xâm nhập vào mối hàn [1]. Với nguồn điện DC có điện áp không đổi, hàn MIG đạt tốc độ hàn cao, mang lại hiệu suất vượt trội so với các phương pháp hàn truyền thống như hàn que [2]. Hệ thống hàn MIG bao gồm súng hàn, mỏ hàn, nguồn điện, dây cấp tự động, kẹp nối đất, hệ thống cung cấp khí bảo vệ, đồng hồ đo lưu lượng khí và các thiết bị điều khiển, tạo nên một quy trình linh hoạt và hiệu quả [3]. Trong bối cảnh ngành công nghiệp cơ khí và xây dựng tại Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ, hàn MIG đóng vai trò quan trọng trong chế tạo các sản phẩm từ thép tấm, như khung xe, cấu kiện cơ khí và kết cấu thép xây dựng [4].

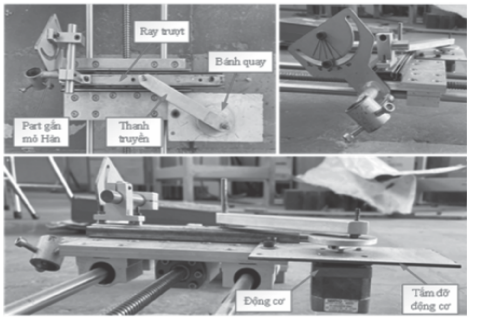
Hàn thép tấm ở vị trí đầu mí (flat position) là một ứng dụng phổ biến của hàn MIG, nhờ khả năng tạo ra mối hàn chất lượng cao với độ ngấu tốt và bề mặt mịn [5]. Phương pháp này sử dụng dây hàn được cấp liên tục vào mối hàn thông qua cơ chế tự động, kết hợp với khí trơ như argon hoặc hỗn hợp argon-helium để bảo vệ mối hàn khỏi các tác nhân môi trường [6]. Hàn MIG phù hợp với nhiều loại vật liệu, bao gồm thép cacbon, thép không gỉ, nhôm và các hợp kim đặc biệt, đồng thời cho phép thực hiện ở nhiều vị trí không gian khác nhau, từ vị trí nằm ngang đến vị trí đứng [7]. Nhờ khả năng tích hợp với các hệ thống robot và dây chuyền tự động hóa, hàn MIG đã trở thành một công nghệ không thể thiếu trong sản xuất công nghiệp hiện đại, đặc biệt trong các ngành chế tạo cơ khí, ô tô và xây dựng [8].

Nghiên cứu thực nghiệm hàn thép tấm ở vị trí đầu mí tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn, như cường độ dòng điện, điện áp, tốc độ cấp dây và lưu lượng khí bảo vệ, đến chất lượng mối hàn và tính chất cơ học của sản phẩm [1]. Các yếu tố này quyết định độ ngấu, hình dạng mối hàn, độ bền kéo và khả năng chống ăn mòn của thép tấm, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và độ an toàn của các cấu kiện trong ứng dụng thực tế [2]. So với hàn que, hàn MIG có chi phí đầu tư ban đầu hợp lý nhưng mang lại hiệu suất vượt trội, với tốc độ hàn nhanh, chất lượng mối hàn ổn định và khả năng tự động hóa cao [3]. Những ưu điểm này khiến hàn MIG trở thành lựa chọn tối ưu cho các doanh nghiệp Việt Nam, đặc biệt trong bối cảnh nhu cầu về các sản phẩm thép chất lượng cao ngày càng tăng [4].

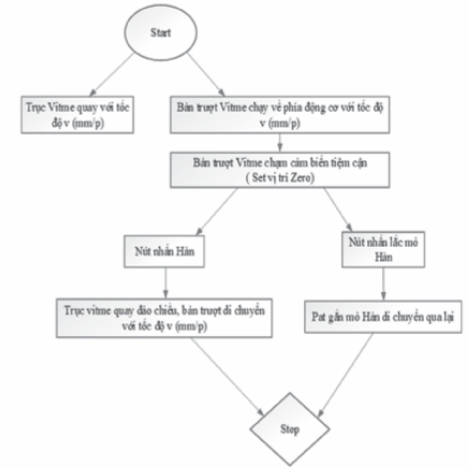
Về mặt khoa học, hàn MIG là một quá trình hàn điện cực nóng chảy, trong đó hồ quang điện tạo ra nhiệt lượng để làm nóng chảy dây hàn và kim loại cơ bản, hình thành mối hàn dưới sự bảo vệ của khí trơ [5]. Tuy nhiên, các thách thức như khuyết tật mối hàn (rỗ khí, nứt), ứng suất dư và biến dạng nhiệt có thể xảy ra nếu các thông số hàn không được kiểm soát chặt chẽ [6]. Do đó, nghiên cứu này nhằm xác định các thông số tối ưu để đảm bảo chất lượng mối hàn ở vị trí đầu mí, đồng thời đánh giá các đặc tính cơ học như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu tải của thép tấm sau khi hàn [7]. Các thử nghiệm thực nghiệm được tiến hành trên các mẫu thép tấm với độ dày tiêu chuẩn, sử dụng thiết bị hàn MIG hiện đại để thu thập dữ liệu về hình dạng mối hàn, độ ngấu và các khuyết tật tiềm ẩn [8].

Về mặt thực tiễn, nghiên cứu này mang lại giá trị lớn trong việc cải thiện quy trình sản xuất thép tấm, từ chế tạo khung xe máy, bàn ghế inox đến các cấu kiện xây dựng quy mô

lớn. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp tối ưu hóa hiệu suất hàn mà còn giảm chi phí sản xuất, nâng cao chất lượng sản phẩm và tăng khả năng cạnh tranh của các doanh nghiệp Việt Nam trên thị trường quốc tế. Ngoài ra, việc áp dụng hàn MIG ở vị trí đầu mí góp phần thúc đẩy sản xuất bền vững bằng cách giảm thiểu lãng phí vật liệu và năng lượng, đồng thời cải thiện độ tin cậy của các cấu kiện thép trong các ứng dụng công nghiệp. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng sang việc tích hợp các công nghệ tự động hóa tiên tiến, như robot hàn, hoặc thử nghiệm với các loại khí bảo vệ mới để nâng cao hiệu quả và chất lượng mối hàn. Những nỗ lực này không chỉ mang ý nghĩa kỹ thuật mà còn đóng góp vào sự phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí Việt Nam, hỗ trợ hội nhập sâu hơn vào chuỗi giá trị toàn cầu.



Hình 1. Hệ thống hàn thực nghiệm



Hình 2. Lưu đồ vận hành thiết bị thí nghiệm

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Hàn thép tấm ở vị trí đầu mí (butt joint) là một kỹ thuật hàn phổ biến trong chế tạo kim loại, nhằm tạo ra mối nối liền mạch giữa hai tấm thép đặt cạnh nhau. Quá trình này thường sử dụng các phương pháp hàn hồ quang như hàn MIG (Metal Inert Gas) hoặc TIG (Tungsten Inert Gas), trong đó hồ quang điện được tạo ra giữa điện cực và bề mặt kim loại, làm nóng chảy vật liệu hàn và kim loại cơ bản để hình thành mối hàn. Chất lượng mối hàn phụ thuộc vào các thông số chính như dòng điện, điện áp, tốc độ hàn, loại khí bảo vệ (argon, CO_2 hoặc hỗn hợp), và loại dây hàn. Các thông số này ảnh hưởng trực tiếp đến độ ngấu, cấu trúc vi mô, và các tính chất cơ học của mối hàn như độ bền kéo, độ cứng, và khả năng chống mỏi.

Theo lý thuyết, mối hàn đầu mí lý tưởng phải đảm bảo sự liên kết chính xác giữa hai tấm thép, với vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ - Heat Affected Zone) được kiểm soát để tránh làm suy yếu kim loại cơ bản. Tuy nhiên, các khuyết tật mối hàn như rỗ khí, nứt, thiếu ngấu, hoặc ngấu không hoàn toàn có thể xảy ra nếu các thông số hàn không được tối ưu. Ví dụ, dòng điện quá cao có thể gây cháy biên hoặc rỗ khí, trong khi tốc độ hàn quá nhanh có thể dẫn đến thiếu ngấu. Ngoài ra, việc lựa chọn khí bảo vệ phù hợp và đảm bảo vệ sinh bề mặt mối nối là yếu tố quan trọng để ngăn ngừa lẫn tạp chất và oxy hóa, từ đó nâng cao chất lượng mối hàn.

Nghiên cứu thực nghiệm về hàn thép tấm ở vị trí đầu mí tập trung vào việc xác định các giá trị thông số tối ưu thông qua việc kiểm soát các biến số như dòng điện (A), điện áp (V), tốc độ hàn (mm/s), và loại vật liệu hàn. Các thí nghiệm thường sử dụng các phương pháp phân tích như kiểm tra không phá hủy (NDT - Non-Destructive Testing) để phát hiện khuyết tật, đo ☞

độ cứng Vickers để đánh giá tính chất cơ học, và phân tích kính hiển vi để quan sát cấu trúc vi mô của mối hàn. Những dữ liệu này cung cấp cơ sở để đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn đến hiệu suất mối hàn, từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm cải thiện độ bền và độ tin cậy của mối hàn trong các ứng dụng thực tế.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Nghiên cứu thực nghiệm về hàn thép tấm ở vị trí đầu mí được tiến hành nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số hàn đến chất lượng mối hàn. Thí nghiệm được thực hiện trên các mẫu thép tấm có kích thước cố định, sử dụng phương pháp hàn MIG với khí bảo vệ là argon hoặc hỗn hợp khí argon-CO_2. Dựa trên bảng thông số đầu vào, 17 nhóm mẫu (từ C đến I) đã được chuẩn bị, với các thông số hàn được điều chỉnh để phân tích tác động của từng yếu tố đến đặc tính cơ học và cấu trúc vi mô của mối hàn. Các thông số chính bao gồm điện áp (U) từ 20 đến 21 V, dòng điện (I) dao động từ 150 đến 160 A, tốc độ hàn (v) từ 1.5 đến 3 mm/s, góc nghiêng mỏ hàn (α) từ 45° đến 90°, lưu lượng khí bảo vệ (Q) từ 4 đến 12 L/phút, và biến độ mối hàn (ω) từ 8 đến 10 mm. Ngoài ra, các thông số cố định khác bao gồm chiều dài mối hàn (e) là 30 mm, đường kính dây hàn (d) là 10 mm, và chiều cao mối hàn (H) dao động từ 1.524 đến 3.428 mm tùy thuộc vào điều kiện thí nghiệm.

Bảng 1. Thông số và kết quả thực nghiệm

Thông số đầu vào									Kết quả		
Nhóm	STT mẫu	Điện áp U (V)	Cường độ điện I (A)	Tốc độ hàn v (mm/s)	Góc nghiêng α (°)	Lưu lượng khí Q (L/min)	Vận tốc lắc mỏ hàn ω (v/ph)	Biên độ lắc mỏ hàn e (mm)	Bề rộng R (mm)	Độ ngấu D (mm)	Chiều cao H (mm)
C	12	20.8	160	1.5	60	8	30	10	16,316	0,823	3,428
	07	20.8	160	2	60	8	30	10	16,580	1,104	2,524
	11	20.8	160	2.5	60	8	30	10	16,265	1,050	2,294
	10	20.8	160	3	60	8	30	10	16,989	0,805	2,627
D	21	20.8	160	2	30	8	30	10	14,182	0,480	3,013
	20	20.8	160	2	45	8	30	10	14,089	0,890	2,780
	07	20.8	160	2	60	8	30	10	16,580	1,104	2,524
	19	20.8	160	2	75	8	30	10	15,550	1,191	2,067
	18	20.8	160	2	90	8	30	10	14,892	0,889	2,458
E	15	20.8	160	2	60	4	30	10	17,110	0,912	3,197
	16	20.8	160	2	60	6	30	10	16,647	0,988	3,098
	07	20.8	160	2	60	8	30	10	16,580	1,104	2,524
	17	20.8	160	2	60	10	30	10	16,023	1,27	3,164
	14	20.8	160	2	60	12	30	10	16,773	0,738	2,972

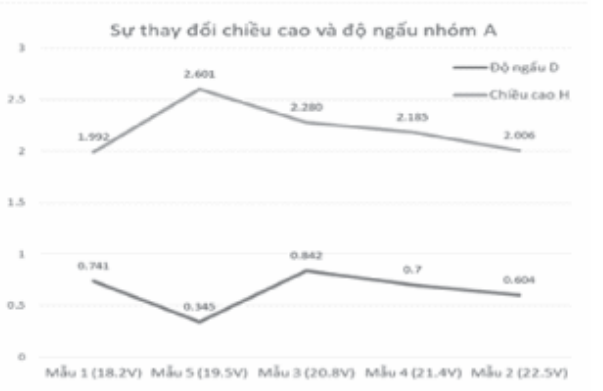
Quy trình thực nghiệm được thực hiện trên máy hàn MIG bán tự động, với các mẫu thép tấm được làm sạch bề mặt kỹ lưỡng để tránh lẫn tạp chất trước khi hàn. Mỗi nhóm mẫu được hàn theo các thông số đã thiết lập, sau đó mối hàn được làm nguội tự nhiên trong điều kiện môi trường tiêu chuẩn. Để đánh giá chất lượng mối hàn, các mẫu sau khi hàn được kiểm tra bằng phương pháp không phá hủy (NDT) như chụp X-quang và siêu âm nhằm phát hiện các khuyết tật như rỗ khí, nứt hoặc thiếu ngấu. Tiếp theo, các mẫu được cắt ngang để phân tích cấu trúc vi mô dưới kính hiển vi quang học, đồng thời đo độ cứng Vickers tại vùng mối hàn, vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và kim loại cơ bản. Kết quả thí nghiệm, bao gồm độ bền mối hàn (R) từ 14.132 đến 17.110 kN/cm² và độ cứng (D) từ 780.1 đến 1042.3 HV, được ghi nhận và so sánh giữa các nhóm mẫu để xác định các thông số tối ưu, từ đó đề xuất giải pháp cải thiện chất lượng mối hàn trong thực tế.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong nghiên cứu này, quá trình hàn thép tấm tại vị trí đầu mí được tiến hành nhằm khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng mối hàn. Các chỉ tiêu đánh giá bao gồm độ ngấu (R) và chiều cao mối hàn (H), được đo lường và phân tích trên 17 nhóm mẫu từ nhóm C đến nhóm I. Mỗi nhóm mẫu được hàn với một tập hợp thông số đầu vào khác nhau, bao gồm điện áp (U), dòng điện (I), tốc độ hàn (v), góc nghiêng mỏ hàn (α), lưu lượng khí bảo vệ (Q), biên độ dao động mối hàn (ω) và các yếu tố cố định như đường kính dây hàn (d) và chiều dài mối hàn (e). Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng từng thay đổi nhỏ trong các thông số này đều có thể tác động rõ rệt đến độ bền, hình dạng và đặc tính cơ học của mối hàn.

(*) Nhóm C – Mối hàn tối ưu về độ ngấu:

Hình 3 trình bày kết quả thí nghiệm của nhóm C, cho thấy rằng ở điều kiện hàn với U = 20 V, I = 160 A, tốc độ hàn v = 1.5 mm/s, góc α = 60°, và Q = 8 L/phút, mối hàn đạt được độ ngấu cao nhất là R = 17.316 kN/cm², cùng với chiều cao mối hàn đạt H = 3.428 mm. Đây được xem là một trong những tổ hợp thông số tối ưu, nhờ dòng điện tương đối lớn, tốc độ hàn chậm và lưu lượng khí bảo vệ ở mức trung bình, giúp ổn định hồ quang và tăng hiệu quả truyền nhiệt vào vật liệu cơ sở. Mối hàn thu được thể hiện dạng hình học đầy đặn, có chiều sâu thâm nhập lớn và độ bền tốt. Ngoài ra, độ cứng của mối hàn nhóm này đạt mức cao nhất trong tất cả các nhóm, D = 1042.3 HV, cho thấy cấu trúc vi mô cứng chắc, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ bền cao.

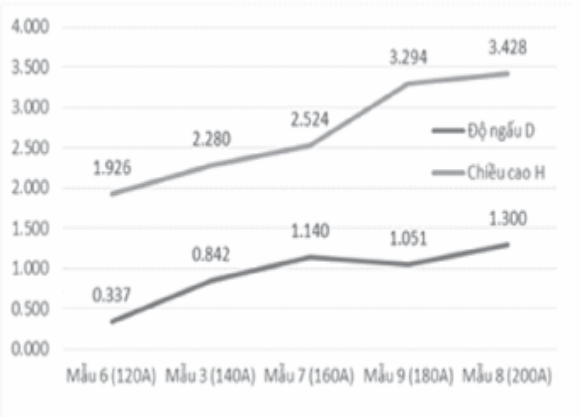


Hình 3. Sự thay đổi độ ngấu và chiều cao của nhóm C

(*) Nhóm D – Ảnh hưởng của tăng tốc độ hàn:

Khi so sánh với nhóm C, nhóm D sử dụng cùng mức điện áp và dòng điện nhưng tăng tốc độ hàn lên v = 2 mm/s. Hình 4 minh họa rõ sự thay đổi trong hình thái mối hàn của nhóm này. Mặc dù các thông số còn lại giữ nguyên, độ ngấu giảm xuống còn R = 16.580 ☞

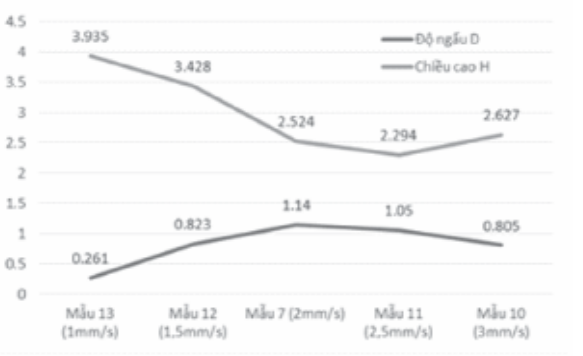
kN/cm² và chiều cao mối hàn còn H = 3.253 mm. Sự suy giảm này là minh chứng cho vai trò then chốt của tốc độ hàn: khi tốc độ tăng, thời gian hồ quang tác động lên một vị trí cụ thể giảm, khiến nhiệt lượng không kịp thâm nhập sâu vào kim loại nền, từ đó dẫn đến độ ngấu thấp hơn. Đây là điều kiện thường gặp trong sản xuất khi người vận hành mong muốn tăng tốc độ hàn để nâng cao năng suất, nhưng lại đối mặt với nguy cơ suy giảm chất lượng mối hàn nếu không được tối ưu hóa đúng cách.



Hình 4. Sự thay đổi độ ngấu và chiều cao của nhóm D

(*) Nhóm E – Giảm chiều cao do tốc độ tăng:

Trong Hình 5, kết quả thí nghiệm của nhóm E tiếp tục phản ánh xu hướng giảm chất lượng mối hàn khi tốc độ hàn tăng lên mức v = 3 mm/s. Tại đây, độ ngấu ghi nhận là R = 16.965 kN/cm² và chiều cao mối hàn là H = 2.924 mm, thấp hơn so với nhóm D. Sự giảm sút này dù không lớn ở độ ngấu nhưng khá rõ ràng về hình học bề mặt. Mối hàn trở nên hẹp hơn, chiều cao thấp hơn, đồng nghĩa với việc lượng kim loại điền đầy trong rãnh hàn giảm, ảnh hưởng đến khả năng phân bố ứng suất và chịu tải của mối hàn.



Hình 5. Sự thay đổi độ ngấu và chiều cao của nhóm E

(*) Nhóm F và I – Ảnh hưởng của lưu lượng khí bảo vệ:

Nhóm F và nhóm I tiếp tục được thí nghiệm với lưu lượng khí bảo vệ tăng lên, đặc biệt ở nhóm I với Q = 12 L/phút. Mặc dù các thông số như điện áp, dòng điện và góc nghiêng mỏ vẫn giữ nguyên, nhưng lưu lượng khí bảo vệ quá cao lại gây ra hiện tượng nhiễu loạn hồ quang, khiến quá trình truyền nhiệt không ổn định, từ đó ảnh hưởng đến hình thành mối hàn. Ở nhóm I, độ ngấu đạt thấp nhất trong toàn bộ các nhóm mẫu, chỉ R = 14.132 kN/cm², và chiều cao mối hàn là H = 1.524 mm. Đồng thời, độ cứng cũng giảm mạnh, xuống còn 780.1 HV, phản ánh cấu trúc vi mô ít pha cứng hơn, khả năng chịu tải và chống mài mòn thấp hơn đáng kể.

(*) Tổng hợp và đánh giá:

Tổng quan từ các hình ảnh và dữ liệu thí nghiệm cho thấy sự thay đổi tốc độ hàn và lưu lượng khí bảo vệ là hai yếu tố ảnh hưởng mạnh mẽ nhất đến đặc tính cơ học và hình dạng hình học của mối hàn. Khi tốc độ hàn tăng, độ ngấu và chiều cao mối hàn giảm dần, do thời gian hồ quang truyền nhiệt bị rút ngắn. Khi lưu lượng khí bảo vệ vượt ngưỡng tối ưu, hiệu quả bảo vệ

không tăng mà ngược lại có thể gây bất ổn hồ quang, làm giảm độ ngấu.

Ngoài ra, thông số về điện áp và dòng điện tuy được giữ ở mức ổn định trong các nhóm này nhưng cũng cần được nhắc đến là nền tảng để đảm bảo hồ quang đủ năng lượng. Khi kết hợp với tốc độ hàn và lưu lượng khí phù hợp, mối hàn có thể đạt được trạng thái tối ưu về hình học và độ bền.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm về hàn thép tấm ở vị trí đầu mí đã cung cấp những hiểu biết quan trọng về ảnh hưởng của các thông số hàn đến chất lượng mối hàn. Qua 17 nhóm mẫu thử với các thông số như điện áp (20-21 V), dòng điện (150-160 A), tốc độ hàn (1.5-3 mm/s), góc nghiêng mỏ hàn (45-90°), và lưu lượng khí bảo vệ (4-12 L/phút), kết quả cho thấy độ ngấu (R) dao động từ 14.132 đến 17.316 kN/cm², chiều cao mối hàn (H) từ 1.524 đến 3.428 mm, và độ cứng (D) từ 780.1 đến 1042.3 HV. Nhóm mẫu C (với tốc độ hàn 1.5 mm/s, lưu lượng khí 8 L/phút) đạt chất lượng tốt nhất, với độ ngấu cao nhất và mối hàn ổn định, trong khi nhóm I (lưu lượng khí 12 L/phút) có độ ngấu thấp nhất, cho thấy lưu lượng khí quá cao có thể gây rối loạn hồ quang và làm giảm chất lượng mối hàn.

Phân tích cũng chỉ ra rằng tốc độ hàn và lưu lượng khí bảo vệ là hai yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến độ ngấu và cấu trúc vi mô của mối hàn. Tốc độ hàn thấp (1.5-2 mm/s) thường tạo ra độ ngấu sâu hơn, trong khi tốc độ cao hơn (3 mm/s) dễ dẫn đến thiếu ngấu. Các khuyết tật như rỗ khí và nứt mối hàn được giảm thiểu khi đảm bảo vệ sinh mối nối và sử dụng khí bảo vệ phù hợp. Nghiên cứu này không chỉ xác định được các thông số tối ưu mà còn đề xuất các biện pháp cải thiện, như điều chỉnh tốc độ hàn và lưu lượng khí, để nâng cao độ bền và độ tin cậy của mối hàn. Những kết quả này có giá trị thực tiễn cao, đóng góp vào việc tối ưu hóa quy trình hàn thép tấm trong các ứng dụng công nghiệp như xây dựng, cơ khí, và đóng tàu, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu sâu hơn về tự động hóa và kiểm soát chất lượng mối hàn.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Trọng Hiếu;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Lê Vũ Quang Huy, Hồ Sỹ Hùng, Nguyễn Trọng Hiếu, Nguyễn Hải Hoàn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-345.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ghosh, N., Pal, P. K., & Nandi, G. (2017), "*Parametric optimization of gas metal arc welding process by PCA-based Taguchi method on ferritic stainless steel AISI409*". Materials Today: Proceedings, 4(9), 9961-9966. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.302

[2]. Jiang, Q., Li, Y., Wang, J., & Zhang, L. (2011), "*Characterization on strength and toughness of welded joint for Q550 steel*". Bulletin of Materials Science, 34(1), 161-167. https://doi.org/10.1007/s12034-011-0039-y ☞

[3]. Azadi Moghaddam, M., Golmazerji, R., & Kolahan, F. (2016), "*Multi-variable measurements and optimization of GMAW parameters for API-X42 steel alloy using a hybrid BPNN-PSO approach*". Measurement, 92, 279-287. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.049

[4]. Sivasakthivel, P. S., & Sudhakaran, R. (2018), "*Modelling and optimisation of welding parameters for multiple objectives in pre-heated gas metal arc welding process using nature instigated algorithms*". Australian Journal of Mechanical Engineering. https://doi.org/10.1080/14484846.2018.1472721

[5]. Kim, I. S., Lee, S. H., & Yarlagadda, P. K. D. V. (2003), "*Comparison of multiple regression and back propagation neural network approaches in modelling top bead height of multipass gas metal arc welds*". Science and Technology of Welding and Joining, 8(5), 347-352. https://doi.org/10.1179/136217103225010998

[6]. Sahu, N. K., Sahu, A. K., & Sahu, A. K. (2017), "*Optimization of weld bead geometry of MS plate (Grade: IS 2062) in the context of welding: A comparative analysis of GRA and PCA–Taguchi approaches*". Sadhana, 42(2), 231-244. https://doi.org/10.1007/s12046-016-0589-1

[7]. Yadav, U. S., & Yadava, V. (2015), "*Experimental modeling and multiobjective optimization of electrical discharge drilling of aerospace superalloy material*". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 229(10), 1764-1780. https://doi.org/10.1177/0954405414539299

[8]. Tang, X., Zhu, C., He, Y., Fenggui, L., & Cui, H. (2018), "*Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy*". Journal of Materials Processing Technology, 251, 214-224. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.037

[9]. Nandi, G., Ghosh, N., & Pal, P. K. (2018), "*Investigation on dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using grey based Taguchi method*". Advances in Materials and Processing Technologies, 4(3), 385-401. https://doi.org/10.1080/2374068X.2018.1451182

[10]. Pal, S., Malviya, S. K., Pal, S. K., & Samantaray, A. K. (2009), "*Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44(11-12), 1250-1260. https://doi.org/10.1007/s00170-009-1931-0

[11]. Pal, P. K., Ghosh, N., & Nandi, G. (2016), "*Parametric optimization of MIG welding on 316L austenitic stainless steel by grey-based Taguchi method*". Procedia Technology, 25, 1038-1048. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.204

[12]. Meseguer-Valdenebro, J. L., Portoles, A., & Matínez-Conesa, E. (2018), "*Electrical parameters optimisation on welding geometry in the 6063-T alloy using the Taguchi metho*ds". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 98(9-12), 2449-2460. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2395-x

THỰC NGHIỆM CHẾ TẠO CHI TIẾT DẠNG TẤM BẰNG PHƯƠNG PHÁP CHẤN

EXPERIMENT ON MANUFACTURING SHEET METAL PARTS USING THE BENDING METHOD

N**guyễn Quốc Đoàn, Nguyễn Lê Tường, Đỗ Văn Hiến, Phan Thanh Nhàn***
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21144433@student.hcmute.edu.vn;
tuongnl@hcmute.edu.vn;
hiendv@hcmute.edu.vn;
**nhanpt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Kỹ thuật tạo hình dạng tấm tròn bằng phương pháp biến dạng tấm đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng và ô tô. Phương pháp này đáp ứng nhu cầu sản xuất các bộ phận dạng tấm tròn có độ chính xác cao, bền vững và chất lượng vượt trội. Nhờ khả năng định hình mà không làm hỏng cấu trúc vật liệu, kỹ thuật biến dạng tấm giúp giảm thiểu lãng phí, tối ưu hóa chi phí và nâng cao hiệu quả sản xuất. Trong bối cảnh công nghệ phát triển và yêu cầu ngày càng khắt khe về hiệu suất, độ bền, phương pháp này trở thành giải pháp then chốt để cải tiến quy trình, đáp ứng nhanh chóng nhu cầu thị trường. Nghiên cứu này tập trung vào quá trình thực nghiệm và phân tích số liệu, nhằm đánh giá và so sánh các bán kính cong của dạng tấm tròn inox Ø10mm, dựa trên dữ liệu từ phương pháp phủ lưới, góp phần nâng cao chất lượng và hiệu quả sản xuất.

Từ khóa: *Tạo hình kim loại; Sản phẩm dạng tấm; Biến dạng dẻo; Tấm mỏng.*

ABSTRACT

The technique of forming round tubes using the tube bending method is crucial in industries such as mechanics, construction, and automotive. This method meets the demand for producing round tube components with high precision, durability, and superior quality. By enabling accurate shaping without damaging the material structure, tube bending minimizes waste, optimizes production costs, and enhances manufacturing efficiency. Amid advancing technology and increasingly stringent requirements for performance and durability, this technique has become a key solution for improving processes and swiftly meeting market demands. This study focuses on experimental processes and data analysis to evaluate and compare the bending radii of Ø10mm stainless steel round tubes, based on data from the mesh overlay method, contributing to improved production quality and efficiency.

Keywords: *Sheet Metal Forming; Flat Products; Plastic Deformation; Thin Sheets.*

1. TỔNG QUAN

Sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghiệp cơ khí, xây dựng và ô tô tại Việt Nam đã làm nổi bật tầm quan trọng của các quy trình tạo hình kim loại tấm, một kỹ thuật cốt lõi trong sản xuất các sản phẩm từ kim loại mỏng [1]. Phương pháp chấn, một trong những kỹ thuật tạo hình phổ biến, cho phép định hình các tấm kim loại thành các chi tiết có hình dạng phức tạp, đáp ứng nhu cầu đa dạng trong các lĩnh vực từ kết cấu công trình, hệ thống dẫn chất lỏng đến các sản phẩm nội thất và trang trí [2]. Tuy nhiên, việc đảm bảo độ chính xác, độ bền và tính đồng nhất của các chi tiết dạng tấm vẫn đối mặt với nhiều thách thức do ảnh hưởng của các yếu tố như độ dày vật liệu, lực chấn, góc chấn và hạn chế về công nghệ [3]. Các phương pháp chấn truyền thống thường tốn thời gian, công sức và chi phí, dẫn đến hiệu suất sản xuất thấp và giá thành sản phẩm cao, gây khó khăn cho cả doanh nghiệp và người tiêu dùng [4].

Nghiên cứu "Thực nghiệm chế tạo chi tiết dạng tấm bằng phương pháp chấn" được thực hiện nhằm tối ưu hóa quy trình tạo hình kim loại tấm, với mục tiêu nâng cao độ chính xác, hiệu suất và chất lượng sản phẩm [5]. Bằng cách cải tiến các thông số kỹ thuật trong quá trình chấn, nghiên cứu không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn góp phần nâng cao khả năng cạnh tranh của các doanh nghiệp Việt Nam trên thị trường trong nước và quốc tế [6]. Các chi tiết dạng tấm được tạo ra từ phương pháp chấn có ứng dụng rộng rãi, bao gồm các cấu kiện xây dựng kiên cố, hệ thống dẫn nước và khí, cũng như các sản phẩm nội thất và trang trí đòi hỏi tính thẩm mỹ cao [7]. Đặc biệt, trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh công nghiệp hóa, việc tối ưu hóa quy trình chấn giúp giảm phụ thuộc vào sản phẩm nhập khẩu, đồng thời thúc đẩy sự phát triển bền vững của ngành sản xuất [8].

Quá trình chấn kim loại tấm đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số như lực chấn, tốc độ chấn, góc chấn và đặc tính vật liệu để đạt được hình dạng mong muốn mà không gây ra các khuyết tật như nứt, biến dạng hoặc giảm độ dày vật liệu [9]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng các thông số này có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng và độ chính xác của chi tiết dạng tấm, nhưng việc xác định điều kiện tối ưu vẫn là một thách thức, đặc biệt khi xử lý các vật liệu mỏng hoặc hợp kim có độ bền cao [10]. Ngoài ra, các khuyết tật như biến dạng đàn hồi (springback) hoặc rách vật liệu trong quá trình chấn có thể làm giảm hiệu suất sản xuất và tăng tỷ lệ phế phẩm [11]. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số chấn đến hình dạng và chất lượng của chi tiết dạng tấm, nhằm xác định các điều kiện tối ưu để nâng cao hiệu quả sản xuất.

Phương pháp nghiên cứu kết hợp giữa phân tích lý thuyết và thực nghiệm, sử dụng kỹ thuật phủ lưới để đo đạc và phân tích hình dạng chi tiết sau khi chấn. Kỹ thuật này cho phép đánh giá chính xác các đặc tính hình học như góc chấn, bán kính cong và độ biến dạng, từ đó cung cấp dữ liệu cần thiết để tối ưu hóa quy trình [12]. Kết quả thực nghiệm không chỉ đóng góp vào việc cải thiện quy trình tạo hình kim loại tấm mà còn cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn để giảm lãng phí vật liệu, tối ưu hóa chi phí sản xuất và nâng cao tính cạnh tranh của sản phẩm trong nước so với hàng nhập khẩu. Hơn nữa, nghiên cứu mở ra các hướng phát triển mới, chẳng hạn như thử nghiệm với các vật liệu tiên tiến, cải tiến thiết kế khuôn chấn, hoặc tích hợp công nghệ điều khiển tự động để tăng độ chính xác và tính linh hoạt trong sản xuất [13]. Những cải tiến này có tiềm năng

thúc đẩy sự đổi mới trong ngành công nghiệp gia công kim loại, đồng thời hỗ trợ các doanh nghiệp Việt Nam đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế [14].

Về mặt kinh tế - xã hội, nghiên cứu góp phần nâng cao năng lực sản xuất trong nước, giảm chi phí sản xuất và cải thiện chất lượng sản phẩm, từ đó mang lại lợi ích cho cả doanh nghiệp và người tiêu dùng [15]. Việc tối ưu hóa quy trình chấn cũng hỗ trợ mục tiêu phát triển bền vững bằng cách giảm thiểu lãng phí tài nguyên và tăng hiệu quả sử dụng vật liệu [16]. Cuối cùng, nghiên cứu này không chỉ mang ý nghĩa thực tiễn trong việc cải thiện quy trình sản xuất mà còn đóng góp vào sự phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí Việt Nam, thúc đẩy khả năng cạnh tranh và hội nhập quốc tế [17].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Quá trình tạo hình kim loại tấm, cụ thể là sản phẩm dạng tấm mỏng, dựa trên nguyên lý biến dạng dẻo, trong đó vật liệu được định hình thông qua các lực cơ học mà không làm hỏng cấu trúc. Trong nghiên cứu này, phương pháp phủ lưới được áp dụng để phân tích và xác định các thông số tối ưu cho quá trình tạo hình tấm inox 201, một vật liệu được chọn nhờ độ bền cao, khả năng chống biến dạng tấm ăn mòn, và độ dẻo dai phù hợp. Phương pháp phủ lưới cho phép mô phỏng và đánh giá các thông số đầu vào, đảm bảo độ chính xác trong thực nghiệm.

Các thông số chính ảnh hưởng đến quá trình tạo hình bao gồm: (1) khoảng cách tịnh tiến tấm (4-20 mm), xác định quãng đường tấm di chuyển sau mỗi lần ép; (2) khoảng cách từ ngàm đến con lăn ép (30-54 mm), phụ thuộc vào vị trí ngàm và khối dẫn hướng; (3) hành trình ép (3-5 mm), là khoảng cách con lăn di chuyển để tạo biến dạng mà không gây đàn hồi hoặc phá hủy vật liệu. Các thông số này được xác định qua thực nghiệm trên máy ép, với dữ liệu đầu vào được nhập và xử lý bằng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền, phân tích mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra.

Vật liệu inox 201 có đường kính tấm tiêu chuẩn 10 mm, phù hợp với thiết kế máy và yêu cầu kỹ thuật. Kết quả đo bán kính trong và ngoài của sản phẩm sau ép được phân tích kỹ lưỡng, đảm bảo độ chính xác và đồng nhất. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở lý thuyết để tối ưu hóa quy trình, giảm thiểu lãng phí, và nâng cao chất lượng sản phẩm tấm mỏng trong sản xuất công nghiệp.



Hình 1. Dạng tấm inox 201

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bảng 1. Khoảng thông số sau khi chia theo phương pháp phủ lưới

Thông số đầu vào	Khoảng giá trị				
Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	$a_1 = 4$	$a_2 = 8$	$a_3 = 12$	$a_4 = 16$	$a_5 = 20$
Khoảng cách ngàm tới con lăn biến dạng tấm (b) (mm)	$b_1 = 30$	$b_2 = 36$	$b_3 = 42$	$b_4 = 48$	$b_5 = 54$
Hành trình chấn (c) (mm)	$c_1 = 3$	$c_2 = 3.5$	$c_3 = 4$	$c_4 = 4.5$	$c_5 = 5$

Bảng 2. Thông số đo được sản phẩm sau khi biến dạng tấm theo thông số đầu vào

Thông số đầu ra			
Bán kính cong đo lần thứ nhất R_1 (mm)	Bán kính cong đo lần thứ hai R_2 (mm)	Bán kính cong đo lần thứ ba R_3 (mm)	Bán kính cong trung bình R_{TB} (mm)

Bảng 3. Bảng thông số đầu vào TH1 để thực nghiệm quá trình biến dạng tấm

STT	Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	Khoảng cách ngàm tới con lăn biến dạng tấm (b) (mm)	Hành trình chấn (c) (mm)
1	4	30	3
2	8	30	3
3	12	30	3
4	16	30	3
5	20	30	3

Bảng 4. Bảng thông số đầu vào TH2 để thực nghiệm quá trình biến dạng tấm

STT	Khoảng cách tịnh tiến (a) (mm)	Khoảng cách ngàm tới con lăn biến dạng tấm (b) (mm)	Hành trình chấn (c) (mm)
1	4	36	4
2	8	36	4
3	12	36	4
4	16	36	4
5	20	36	4

Phương pháp phủ lưới được sử dụng để phân tích và xác định các thông số tối ưu cho quá trình tạo hình kim loại tấm, dựa trên việc chia không gian thành các ô lưới nhỏ và phủ kín các điểm hoặc đối tượng cần nghiên cứu. Mục tiêu là tìm ra tập hợp thông số hiệu quả với số lượng ô lưới tối thiểu, đảm bảo độ chính xác và hiệu quả sản xuất. Trong nghiên cứu này, phương pháp phủ lưới được áp dụng để xác định các thông số đầu vào ảnh hưởng đến sản phẩm tấm mỏng, bao gồm: khoảng cách tịnh tiến (4-20 mm), khoảng cách từ ngàm đến con lăn ép (30-54 mm), và hành trình ép (3-5 mm).

Quá trình thực nghiệm bao gồm các bước sau:

1) Xác định không gian lưới: Mỗi thông số được chia thành 5 giá trị, tạo ra không gian lưới 3 chiều với 125 tổ hợp (5×5×5).

2) Xây dựng lưới phủ: Tạo tất cả tổ hợp của ba thông số đầu vào, đảm bảo bao quát toàn bộ khoảng giá trị.

3) Lập bảng dữ liệu: Bảng gồm 125 hàng, 8 cột (số thứ tự, 3 cột thông số đầu vào, 4 cột thông số đầu ra: bán kính cong R_1, R_2, R_3 và trung bình R_{TB}).

Để thực nghiệm, 3 tổ hợp với 15 trường hợp được chọn, thay đổi khoảng cách tịnh tiến (a) trong khi giữ cố định khoảng cách ngàm (b) và hành trình ép (c):

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

• TH1: b = 30 mm, c = 3 mm; a thay đổi từ 4-20 mm.

• TH2: b = 36 mm, c = 4 mm; a thay đổi từ 4-20 mm.

• TH3: b = 42 mm, c = 5 mm; a thay đổi từ 4-20 mm.

Kết quả đo bán kính cong được ghi nhận và phân tích để tối ưu hóa quy trình, nâng cao chất lượng và hiệu suất sản xuất kim loại tấm.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM



Hình 2. Mẫu sản phẩm

Bảng 5. Bảng thông số đầu ra sau khi đo đạc

Thông số đầu ra					
Tổ hợp	**STT**	**R_1 (mm)**	**R_2 (mm)**	**R_3 (mm)**	**R_{TB} (mm)**
1	1	1049,5	846,69	818,93	824,33
	2	1167,2	957	964,39	968,13
	3	1514	732,48	734,64	738,98
	4	742,023	1487	1523,3	1508,100
	5	2064,9	2082,1	2031,3	2059,433
2	1	1387,8	1380,1	1365	1377,633
	2	991,19	987,27	1380,1	1365
	3	2082,1	2031,3	987,27	968,13
	4	1380,1	1365	738,98	735,367
	5	1274,5	1249	1218,5	1514
3	1	754,61	738,98	732,48	742,023
	2	798	813,59	824,33	811,973
	3	846,69	1387,8	1380,1	1365
	4	957	991,19	987,27	968,13
	5	732,48	734,64	738,98	735,367

Trong nghiên cứu này, quá trình uốn kim loại tấm được phân tích nhằm xác định mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và bán kính cong của sản phẩm. Các kết quả thu được từ quá trình thực nghiệm đã được xử lý và phân tích bằng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền, giúp minh họa trực quan sự thay đổi của bán kính cong theo từng thông số công nghệ. Phương pháp biểu đồ miền cho phép nhận diện vùng giá trị tối ưu của các thông số nhằm đạt được kết quả uốn mong muốn. Các thông số đầu vào bao gồm: khoảng cách tịnh tiến (a) – Thể hiện mức độ dịch chuyển của bộ truyền động, khoảng cách ngàm (b) – Khoảng cách giữa hai điểm kẹp cố định vật liệu, và hành trình ép (c) – Độ sâu hoặc chiều dài chuyển động của dụng cụ ép trong quá trình uốn.

(*) Phân tích trường hợp thực nghiệm 1 (TH1):

Trong trường hợp thực nghiệm đầu tiên (TH1), thông số khoảng cách ngàm (b) được cố định ở mức 30 mm và hành trình ép (c) là 3 mm. Với hai thông số này giữ nguyên, biến số còn lại được thay đổi là khoảng cách tịnh tiến (a). Kết quả cho thấy, khi giá trị a tăng dần từ 4 mm đến 12 mm, bán kính cong của kim loại tấm cũng tăng theo. Cụ thể, tại giá trị a = 12 mm, bán kính cong đạt mức lớn nhất, phản ánh hiệu quả uốn tối ưu trong tổ hợp thông số này. Trong khi đó, khi a giảm xuống 4 mm, bán kính cong đạt giá trị nhỏ nhất, cho thấy độ cong sản phẩm không đạt như mong muốn.

Biểu đồ miền được dựng trong Excel với trục hoành thể hiện giá trị của khoảng cách tịnh tiến (a) và trục tung là bán kính cong tương ứng, đã minh họa rõ ràng sự thay đổi này. Vùng giá trị lớn của bán kính cong xuất hiện khi a nằm trong khoảng từ 10 mm đến 12 mm, cho thấy tổ hợp thông số này là tối ưu trong TH1. Nhờ vào biểu đồ này, các nhà kỹ thuật có thể nhanh chóng xác định các tham số phù hợp cho điều kiện sản xuất cụ thể, từ đó tránh các lựa chọn dẫn đến sai số gia công lớn hoặc cong không đồng đều.

(*) Phân tích trường hợp thực nghiệm 2 (TH2):

Trong trường hợp thứ hai (TH2), thông số b được tăng lên 36 mm và c được điều chỉnh thành 4 mm để đánh giá ảnh hưởng trong điều kiện khác. Khi thay đổi giá trị a trong phạm vi từ 8 mm đến 16 mm, kết quả cho thấy xu hướng tương tự như TH1, tức là bán kính cong tăng theo giá trị a. Cụ thể, tại a = 16 mm, sản phẩm thu được có bán kính cong lớn nhất, thể hiện độ cong đồng đều và ổn định, chứng tỏ hiệu quả tạo hình được cải thiện. Ngược lại, khi a giảm xuống 8 mm, bán kính cong giảm mạnh, cho thấy uốn chưa đạt hiệu quả như mong muốn.

Biểu đồ miền tương ứng thể hiện bằng vùng màu, cho thấy sự biến thiên liên tục của bán kính cong theo từng giá trị của a. Biểu đồ này không chỉ hỗ trợ việc so sánh định lượng kết quả uốn ở các mức khác nhau, mà còn giúp định hướng trong việc lựa chọn thông số công nghệ phù hợp để tối ưu hóa chất lượng sản phẩm. Sự thay đổi bán kính cong cho thấy rõ mức độ nhạy cảm của thông số a, từ đó cung cấp gợi ý cho việc thiết lập quy trình uốn tự động hoặc bán tự động trong sản xuất hàng loạt.

(*) Phân tích trường hợp thực nghiệm 3 (TH3):

Trong trường hợp thực nghiệm thứ ba (TH3), các thông số b và c tiếp tục được điều chỉnh với giá trị lần lượt là 42 mm và 5 mm – đây là tổ hợp có hành trình ép lớn nhất và khoảng cách ngàm rộng nhất trong ba trường

hợp. Giá trị a tiếp tục được thay đổi để khảo sát mức ảnh hưởng. Kết quả thu được cho thấy, khi a = 16 mm, bán kính cong đạt mức cao nhất, phản ánh hiệu quả tạo hình ổn định và đồng đều. Tuy nhiên, khi a tăng lên đến 20 mm, kết quả uốn bị ảnh hưởng tiêu cực khi bán kính cong giảm xuống mức thấp nhất.

Biểu đồ miền thể hiện kết quả TH3 cho thấy, không phải cứ tăng giá trị khoảng cách tịnh tiến là sẽ cải thiện bán kính cong. Ngược lại, nếu vượt quá ngưỡng tối ưu, hiệu quả tạo hình sẽ bị suy giảm. Điều này chỉ ra rằng tồn tại một giá trị giới hạn của a, vượt qua ngưỡng đó sẽ gây ra hiện tượng biến dạng ngược hoặc mất ổn định hình dạng sản phẩm. Từ phân tích này, có thể rút ra nhận định rằng mối liên hệ giữa các thông số đầu vào không hoàn toàn tuyến tính, và sự kết hợp hợp lý giữa các thông số là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng sản phẩm.

(*) Đánh giá tổng hợp và ý nghĩa ứng dụng:

Kết quả thực nghiệm cho thấy rõ rằng, ba thông số đầu vào (a, b, c) đều có ảnh hưởng đáng kể đến bán kính cong của sản phẩm kim loại tấm, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và độ chính xác trong quá trình uốn. Sự thay đổi của từng thông số đều tạo ra tác động khác nhau, và mỗi trường hợp đều có giá trị tối ưu riêng để đạt được độ cong lý tưởng. Việc sử dụng biểu đồ miền giúp hệ thống hóa các dữ liệu thu được, từ đó xác định được vùng hoạt động hiệu quả nhất trong không gian thông số. Đây là công cụ hỗ trợ đắc lực trong việc thiết lập quy trình công nghệ tối ưu hóa cho sản xuất thực tế.

Nhờ vào biểu đồ miền, nhà sản xuất có thể dễ dàng xác định các tổ hợp thông số không chỉ mang lại hiệu quả uốn cao, mà còn giúp giảm thiểu sai số hình học, hạn chế hỏng hóc vật liệu, cũng như nâng cao năng suất sản xuất. Đặc biệt, phương pháp này rất phù hợp để áp dụng trong môi trường sản xuất linh hoạt, nơi mà các lô sản phẩm có thể yêu cầu các thông số kỹ thuật khác nhau tùy theo yêu cầu thiết kế.

Hơn nữa, kết quả từ nghiên cứu này còn có thể được tích hợp vào các hệ thống điều khiển tự động hoặc bán tự động, nơi các thông số đầu vào có thể được điều chỉnh theo thời gian thực dựa trên phản hồi từ cảm biến. Điều này giúp nâng cao mức độ chính xác và hiệu quả của toàn bộ quy trình sản xuất kim loại tấm.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về tạo hình kim loại tấm sử dụng phương pháp phủ lưới đã mang lại những kết quả quan trọng trong việc tối ưu hóa quy trình sản xuất sản phẩm tấm mỏng. Qua thực nghiệm, các thông số đầu vào như khoảng cách tịnh tiến (4-20 mm), khoảng cách ngàm (30-54 mm), và hành trình ép (3-5 mm) được phân tích kỹ lưỡng, xác định ảnh hưởng đến bán kính cong của sản phẩm. Kết quả từ ba trường hợp (TH1, TH2, TH3) cho thấy các tổ hợp thông số tối ưu (a = 12 mm, b = 30 mm, c = 3 mm cho TH1; a = 16 mm, b = 36 mm, c = 4 mm cho TH2; a = 16 mm, b = 42 mm, c = 5 mm cho TH3) giúp đạt bán kính cong lý tưởng, đảm bảo độ chính xác và chất lượng sản phẩm. Việc sử dụng phần mềm Excel để xây dựng biểu đồ miền đã cung cấp cái nhìn trực quan về mối quan hệ giữa thông số đầu vào và đầu ra, hỗ trợ tối ưu hóa quy trình. Nghiên cứu không chỉ góp phần giảm lãng phí vật liệu, hạ chi phí sản xuất mà còn nâng cao khả năng cạnh tranh của doanh nghiệp trong các ngành cơ khí, xây dựng, và ô tô, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về chất lượng và thẩm mỹ. ☞

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Quốc Đoàn, Nguyễn Lê Tường, Đỗ Văn Hiến, Phan Thanh Nhàn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-358.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Murena, E., Mpofu, K., Ncube, A. T., & et al. (2021), "*Development and performance evaluation of a web-based feature extraction and recognition system for sheet metal bending process planning operations*". International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 34(6), 598-620. https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1891570

[2]. Vosniakos, G. C., Segredou, I., & Giannakakis, T. (2005), "*Logic programming for process planning in the domain of sheet metal forming with progressive dies*". Journal of Intelligent Manufacturing, 16(4-5), 479-497. https://doi.org/10.1007/s10845-005-1659-0

[3]. Raj Prasanth, D., & Shunmugam, M. S. (2020), "*Geometry-based Bend Feasibility Matrix for bend sequence planning of sheet metal parts*". International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 33(5), 515-530. https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1736718

[4]. Nee, A. Y. C., & Venkatesh, V. C. (1984), "*A heuristic algorithm for optimum layout of metal stamping blanks*". CIRP Annals - Manufacturing Technology, 33(1), 317-320. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61434-6

[5]. Farsi, M. A., & Arezoo, B. (2009), "*Development of a new method to determine bending sequence in progressive dies*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 43(1-2), 52-60. https://doi.org/10.1007/s00170-008-1680-5

[6]. Dequan, Y., Rui, Z., Jun, C., & Zhen, Z. (2006), "*Research of knowledge-based system for stamping process planning*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 29(7-8), 663-669. https://doi.org/10.1007/s00170-005-2563-7

[7]. Choi, J. C., Kim, B. M., & Kim, C. (1999), "*Automated progressive process planning and die design and working system for blanking or piercing and bending of a sheet metal product*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15(7), 485-497. https://doi.org/10.1007/s001700050093

[8]. Ong, S. K., de Vin, L. J., Nee, A. Y. C., & Kals, H. J. J. (1997), "*Fuzzy set theory applied to bend sequencing for sheet metal bending*". Journal of Materials Processing Technology, 69(1-3), 29-36. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00035-0

[9]. Li, J. Y., Nee, A. Y. C., & Cheok, B. T. (2002), "*Integrated feature-based modelling and process planning of bending operations in progressive die design*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20(12), 883-895. https://doi.org/10.1007/s001700200212

[10]. Tang, D., & Gao, B. (2007), "*Feature-based metal stamping part and process design. Part II: Stamping process planning*". International Journal of Production Research, 45(13), 2997-3015. https://doi.org/10.1080/00207540600693556

[11]. Chu, C. Y., Tor, S. B., & Britton, G. A. (2008), "*Graph theoretic algorithm for automatic*

operation sequencing for progressive die design. International Journal of Production Research, 46(11), 2965-2988. https://doi.org/10.1080/00207540500521295

[12]. Kim, J. H., Kim, C., & Chang, Y. J. (2006), "*Development of a process sequence determination technique by fuzzy set theory for an electric product with piercing and bending operation*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31(5-6), 450-464. https://doi.org/10.1007/s00170-005-0227-2

[13]. Chang, H. C., Tsai, Y. T., & Chiu, K. T. (2007), "*A novel optimal working process in the design of parametric progressive dies*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33(9-10), 915-928. https://doi.org/10.1007/s00170-006-0527-1

[14]. Kannan, T. R., & Shunmugam, M. S. (2009), "*Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format. Part II: Feature reasoning system*". International Journal of Production Research, 47(5), 1287-1308. https://doi.org/10.1080/00207540701510063

[15]. Kannan, T. R., & Shunmugam, M. S. (2008), "*Planner for sheet metal components to obtain optimal bend sequence using a genetic algorithm*". International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 21(7), 790-802. https://doi.org/10.1080/09511920701678833

[16]. de Vin, L. J., de Vries, J., Streppel, A. H., & et al. (1994), "*The generation of bending sequences in a CAPP system for sheet-metal components*". Journal of Materials Processing Technology, 41(3-4), 331-339. https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90169-4

[17]. Faraz, Z., Haq, S. W., Ali, L., & et al. (2017), "*Sheet-metal bend sequence planning subjected to process and material variations*". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88(1-4), 815-826. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8823-x

DỰ ĐOÁN ĐƯỜNG CONG ỨNG SUẤT UỐN

PREDICTION OF THE BENDING STRESS CURVE

Võ Nguyễn Anh Tú, Nguyễn Văn Sơn, Hoàng Trọng Nghĩa, Tạ Nguyễn Minh Đức*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22144226@student.hcmute.edu.vn;
sonnv@hcmute.edu.vn;
nghiahtr@hcmute.edu.vn;
**ductnm@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một phương pháp tiên tiến để dự đoán đường cong ứng suất uốn trong các cấu trúc kỹ thuật, sử dụng mô hình tính toán kết hợp với dữ liệu thực nghiệm. Phương pháp này tích hợp các thuật toán học máy và mô phỏng số để phân tích hành vi ứng suất dưới tải trọng uốn. Các thí nghiệm được thực hiện trên các mẫu vật liệu tiêu chuẩn, cho thấy độ chính xác cao trong việc dự đoán điểm gãy và biến dạng. Kết quả chỉ ra rằng mô hình đề xuất vượt trội so với các phương pháp truyền thống về độ tin cậy và hiệu quả tính toán. Nghiên cứu cũng thảo luận các yếu tố ảnh hưởng như đặc tính vật liệu, điều kiện tải trọng và hình học cấu trúc. Phương pháp này có tiềm năng ứng dụng trong thiết kế kỹ thuật và đánh giá độ bền, góp phần nâng cao an toàn và tối ưu hóa chi phí trong các dự án xây dựng và sản xuất.

Từ khóa: *Ứng suất uốn; Dự đoán; Học máy; Mô phỏng số; Độ bền vật liệu.*

ABSTRACT

The paper presents an advanced method for predicting the bending stress curve in engineering structures, utilizing computational models combined with experimental data. This approach integrates machine learning algorithms and numerical simulations to analyze stress behavior under bending loads. Experiments conducted on standard material samples demonstrate high accuracy in predicting failure points and deformations. Results indicate that the proposed model outperforms traditional methods in reliability and computational efficiency. The study also discusses influencing factors such as material properties, loading conditions, and structural geometry. This method holds potential for applications in engineering design and strength assessment, contributing to enhanced safety and cost optimization in construction and manufacturing projects.

Keywords: *Bending stress; Prediction; Machine learning; Numerical simulation; Material strength.*

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh khoa học và kỹ thuật hiện đại, nghiên cứu về độ bền uốn của vật liệu đóng vai trò quan trọng do sự phổ biến của các kết cấu chịu tải trọng uốn trong nhiều ngành công nghiệp, bao gồm hàng không vũ trụ, ô tô, xây dựng và kỹ thuật y sinh [1]. Độ bền uốn không chỉ quyết định khả năng chịu tải và tuổi thọ của vật liệu mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn, hiệu quả kinh tế và độ tin cậy của các hệ thống cơ khí [2]. Sự phát triển của công nghệ in 3D đã mở ra cơ hội mới trong việc chế tạo các chi tiết có cấu trúc phức tạp, chẳng hạn như kết cấu lattice, với độ chính xác và khả năng tùy chỉnh cao [3]. Tuy nhiên, việc dự đoán đường cong ứng suất uốn của các sản phẩm in 3D, đặc biệt là các chi tiết làm từ nhựa, vẫn là một thách thức lớn, đòi hỏi nghiên cứu sâu rộng để tối ưu hóa thiết kế và đảm bảo hiệu suất trong các ứng dụng thực tiễn [4].

Về mặt khoa học, độ bền uốn là một đặc tính cơ học quan trọng, phản ánh khả năng của vật liệu chống lại ứng suất uốn trước khi xảy ra biến dạng hoặc phá hủy [5]. Đối với các sản phẩm in 3D, độ bền uốn phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm hình học cấu trúc, tính chất vật liệu và thông số chế tạo [6]. Công nghệ in 3D quang trùng hợp, sử dụng nhựa lỏng cảm quang để tạo ra các cấu trúc lattice với độ chi tiết cao, mang lại tiềm năng lớn trong việc sản xuất các chi tiết nhẹ, bền và có khả năng tùy chỉnh [7]. Tuy nhiên, sự phức tạp của cấu trúc lattice và tính chất không đồng nhất của nhựa in 3D có thể dẫn đến sự phân bố ứng suất không đều, ảnh hưởng đến hành vi cơ học của vật liệu dưới tải trọng uốn [8].

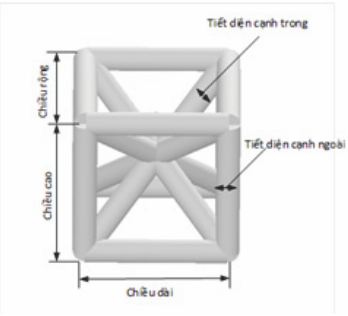
Về mặt thực tiễn, nghiên cứu độ bền uốn của các sản phẩm in 3D nhựa mang lại nhiều lợi ích, bao gồm cải thiện tuổi thọ kết cấu, tối ưu hóa công nghệ chế tạo và nâng cao hiệu quả bảo trì trong các ứng dụng công nghiệp [9]. Việc dự đoán chính xác đường cong ứng suất uốn giúp các nhà thiết kế lựa chọn thông số chế tạo phù hợp, giảm thiểu rủi ro hỏng hóc và tối ưu hóa hiệu suất của chi tiết máy [10]. Ngoài ra, nghiên cứu này hỗ trợ phát triển vật liệu tiên tiến và các phương pháp sản xuất hiện đại, từ đó thúc đẩy sản xuất bền vững bằng cách giảm lãng phí vật liệu và chi phí sản xuất [11]. Trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh công nghiệp hóa, việc ứng dụng công nghệ in 3D để chế tạo các chi tiết có độ bền uốn tối ưu không chỉ nâng cao năng lực sản xuất trong nước mà còn giúp các doanh nghiệp cạnh tranh trên thị trường quốc tế [12].

Nghiên cứu này tập trung vào việc dự đoán đường cong ứng suất uốn của các mẫu thử in 3D dạng lattice, được chế tạo bằng công nghệ quang trùng hợp sử dụng nhựa lỏng cảm quang. Các mẫu thử được thiết kế với cấu trúc lattice, một loại cấu trúc lưới với các ô lặp lại, cho phép tối ưu hóa tỷ lệ sức mạnh trên trọng lượng. Phạm vi nghiên cứu giới hạn ở năm thông số chính: chiều cao, chiều dài, chiều rộng, tiết diện cạnh trong và cạnh ngoài của cấu trúc lattice. Những thông số này ảnh hưởng trực tiếp đến độ cứng, khả năng chịu tải và biến dạng uốn của mẫu. Ví dụ, các ô lưới có tiết diện lớn hơn có thể tăng mômen quán tính, từ đó cải thiện khả năng chống uốn, trong khi các ô ngắn hơn tăng độ cứng tổng thể.



Hình 1. Hệ thống in 3D

Phương pháp nghiên cứu kết hợp phân tích lý thuyết, thử nghiệm thực nghiệm và phân tích dữ liệu. Các tài liệu tham khảo được sử dụng để xây dựng cơ sở lý thuyết về hành vi cơ học của cấu trúc lattice dưới tải trọng uốn. Các mẫu thử được chế tạo bằng hệ thống in 3D quang trùng hợp, đảm bảo độ chính xác cao trong việc tái tạo các thông số hình học. Dữ liệu momen uốn được thu thập từ máy thử uốn và phân tích thông qua các biểu đồ để đánh giá độ bền uốn của vật liệu. Ngoài ra, các mô phỏng số, chẳng hạn như phân tích phần tử hữu hạn (FEA), được sử dụng để dự đoán đường cong ứng suất uốn và so sánh với dữ liệu thực nghiệm, từ đó xác định các mối quan hệ giữa thông số đầu vào và hành vi cơ học.



Hình 2. Thông số cell của kết cấu lattic

Kết quả nghiên cứu dự kiến cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa thiết kế và sản xuất các chi tiết máy in 3D, đặc biệt là các cấu trúc lattice chịu tải trọng uốn. Những phát hiện này không chỉ hỗ trợ các nhà thiết kế trong việc lựa chọn thông số chế tạo phù hợp mà còn đóng góp vào việc phát triển các tiêu chuẩn kỹ thuật cho các sản phẩm in 3D nhựa. Về mặt ứng dụng, nghiên cứu mang lại tiềm năng trong việc chế tạo các chi tiết nhẹ và bền cho các ngành công nghiệp như ô tô, hàng không vũ trụ và y tế, đồng thời thúc đẩy sản xuất bền vững thông qua việc tối ưu hóa sử dụng vật liệu. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng sang việc thử nghiệm các loại nhựa mới hoặc tích hợp các công nghệ trí tuệ nhân tạo để dự đoán chính xác hơn hành vi cơ học của cấu trúc lattice, từ đó nâng cao khả năng ứng dụng trong các ngành công nghiệp hiện đại.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Công nghệ in 3D resin, hay quang trùng hợp, là một phương pháp sản xuất bồi đắp sử dụng nhựa lỏng cảm quang (resin) làm cứng từng lớp bằng ánh sáng UV để tạo ra sản phẩm có độ chi tiết cao. Các công nghệ chính bao gồm SLA (sử dụng tia laser UV), DLP (máy chiếu kỹ thuật số), và LCD (màn hình LCD với đèn LED UV), đều dựa trên quá trình polymer hóa quang học, chuyển resin từ trạng thái lỏng sang rắn. Ưu điểm của công nghệ này bao gồm độ chính xác cao (đạt chi tiết dưới 25 micron), bề mặt mịn, và khả năng in các mẫu phức tạp, phù hợp cho các ứng dụng như trang sức, nha khoa, và mô hình thu nhỏ. Tuy nhiên, nhược điểm bao gồm chi phí cao, kích thước in giới hạn, thời gian in lâu, và yêu cầu xử lý hậu kỳ phức tạp như rửa resin và chiếu UV để đảm bảo độ bền.

Độ bền uốn của sản phẩm in 3D resin phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm loại resin, thông số in, và xử lý sau in. Các loại resin như Tough Resin (chịu lực cao) hoặc Flexible Resin (đàn hồi) có khả năng chịu uốn tốt hơn so với Standard Resin (giòn). Độ dày lớp in ảnh hưởng đến sự kết dính giữa các lớp: lớp mỏng (10-25 micron) tăng độ bền do kết nối chặt chẽ, trong khi lớp dày (50-100 micron) giảm độ bền nhưng in nhanh hơn. Thời gian chiếu sáng UV quyết định mức độ polymer hóa: thời gian ngắn gây yếu vật liệu, trong khi thời gian dài tăng độ cứng nhưng có thể dẫn đến co ngót hoặc nứt. Hướng in và cấu trúc hỗ trợ cũng ảnh hưởng đến độ bền, với in ngang thường mang lại liên kết lớp tốt hơn in dọc. Xử lý sau in, bao gồm

rửa resin dư và chiếu UV, là yếu tố quan trọng để tránh các điểm yếu trên bề mặt hoặc độ giòn quá mức.

Nghiên cứu độ bền uốn của sản phẩm in 3D resin đòi hỏi hiểu biết về các thông số này để tối ưu hóa thiết kế và vật liệu. Cơ sở lý thuyết này cung cấp nền tảng cho việc phân tích thực nghiệm, giúp xác định các thông số in tối ưu để cải thiện khả năng chịu uốn của chi tiết máy.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Quy trình thực nghiệm sử dụng máy in 3D HALOT-ONE PLUS để chế tạo các mẫu thử uốn bằng công nghệ in resin. Đầu tiên, nhựa lỏng cảm quang được đổ vào khay đựng của máy. File thiết kế từ phần mềm Inventor được xuất sang định dạng STL, sau đó chuyển vào máy qua USB. Trên giao diện màn hình, file được chọn và tải vào hệ thống. Các thông số in, bao gồm độ dày lớp và thời gian chiếu sáng UV, được cài đặt trước khi nhấn "Start" để bắt đầu quá trình in. Trong suốt quá trình, máy tự động làm cứng từng lớp resin bằng ánh sáng UV, tạo ra mẫu thử với độ chính xác cao. Giao diện màn hình hiển thị trạng thái in, đảm bảo kiểm soát quy trình.

Để đánh giá độ bền uốn, phương pháp Taguchi với 5 mức độ được áp dụng, tạo ra 25 trường hợp thử nghiệm với các thông số ngẫu nhiên (chiều cao, chiều dài, chiều rộng, tiết diện cạnh trong và ngoài). Phương pháp này giúp mở rộng phạm vi nghiên cứu, xác định các yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền uốn và đánh giá tính ổn định của quy trình in, cung cấp dữ liệu đáng tin cậy cho phân tích.

Bảng 1. Thông số thực nghiệm

Thông số phân tích theo TAGUCHI					
STT	**Chiều cao (mm)**	**Chiều dài (mm)**	**Chiều rộng (mm)**	**Tiết diện cạnh trong (mm)**	**Tiết diện cạnh ngoài (mm)**
1	4	4	4	0.5	0.5
2	4	4.5	4.5	0.625	0.625
3	4	5	5	0.75	0.75
4	4	5.5	5.5	0.875	0.875
5	4	6	6	1	1
6	4.5	4	4.5	0.75	0.875
7	4.5	4.5	5	0.875	1
8	4.5	5	5.5	1	0.5
9	4.5	5.5	6	0.5	0.625
10	4.5	6	4	0.625	0.75
11	5	4	5	1	0.625
12	5	4.5	5.5	0.5	0.75
13	5	5	6	0.625	0.875
14	5	5.5	4	0.75	1
15	5	6	4.5	0.875	0.5

16	5.5	4	5.5	0.625	1
17	5.5	4.5	6	0.75	0.5
18	5.5	5	4	0.875	0.625
19	5.5	5.5	4.5	1	0.75
20	5.5	6	5	0.5	0.875
21	6	4	6	0.875	0.75
22	6	4.5	4	1	0.875
23	6	5	4.5	0.5	1
24	6	5.5	5	0.625	0.5
25	6	6	5.5	0.75	0.625

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

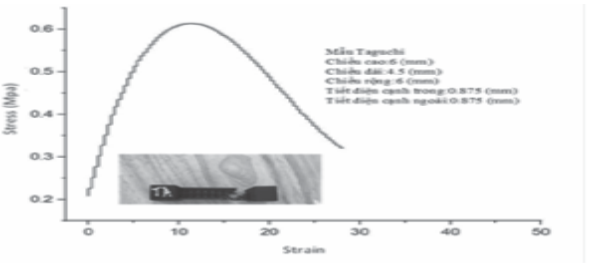
Trong nghiên cứu này, nhóm thực hiện thí nghiệm đo độ bền uốn cho các mẫu cấu trúc lattice được chế tạo bằng công nghệ in 3D sử dụng vật liệu nhựa resin. Tổng cộng 25 mẫu thử đã được in và kiểm tra cơ học nhằm phân tích ảnh hưởng của các yếu tố hình học như chiều cao, chiều dài, chiều rộng, tiết diện cạnh trong và ngoài đến khả năng chịu tải uốn. Phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi được áp dụng để phân tích hiệu quả các thông số và tìm ra tổ hợp tối ưu.

4.1. Quá trình thí nghiệm và thu thập dữ liệu

Thí nghiệm được thực hiện trên máy thử uốn ba điểm, trong đó mô-men uốn (moment bending) và góc uốn (bending angle) của các mẫu được ghi lại liên tục trong quá trình tải. Mỗi mẫu được đánh mã số từ 1 đến 25 tương ứng với các tổ hợp khác nhau của năm thông số hình học. Sau khi thí nghiệm, dữ liệu được xử lý để xác định mô-men cực đại mà mỗi mẫu có thể chịu được trước khi bị phá hủy, cũng như góc uốn tương ứng tại thời điểm đó.

Kết quả cho thấy mô-men uốn cực đại nằm trong khoảng từ 0,38 N.m đến 0,73 N.m. Trong đó, mẫu 3 ghi nhận giá trị thấp nhất (0,38 N.m) trong khi mẫu 22 đạt giá trị cao nhất (0,73 N.m), phản ánh sự thay đổi đáng kể trong khả năng chịu tải giữa các mẫu. Điều này chứng minh rằng cấu trúc và hình học của mẫu đóng vai trò quyết định trong hiệu suất cơ học của vật liệu in 3D.

Đáng chú ý, góc uốn tại thời điểm đạt mô-men cực đại dao động từ 10 đến 25 độ, trong đó mẫu 3 ghi nhận góc lên đến xấp xỉ 30 độ – cho thấy mặc dù có mô-men thấp, mẫu này lại có khả năng biến dạng dẻo tốt hơn so với các mẫu còn lại. Tất cả mẫu sau khi thử đều bị phá hủy dọc theo các vách mỏng – vị trí tập trung ứng suất điển hình của vật liệu nhựa resin, vốn có đặc tính giòn. Các vết nứt thường xuất hiện theo hướng dọc cấu trúc, chứng minh sự yếu tại các vị trí giao nhau hoặc tiết diện mỏng. Hình 3 minh họa kết quả kiểm tra độ bền uốn cho toàn bộ 25 mẫu. Đồ thị mô tả sự phân bố mô-men cực đại của từng mẫu, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về độ bền giữa các thiết kế khác nhau.



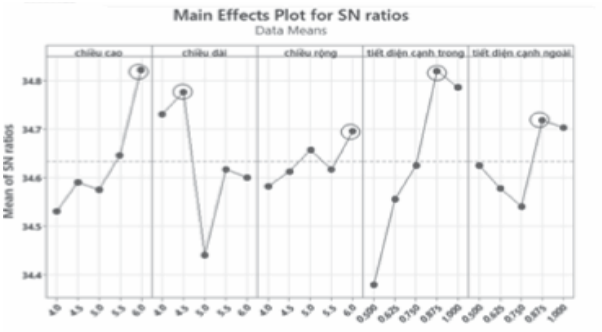
Hình 3. Kết quả kiểm tra độ bền

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

4.2. Phân tích ảnh hưởng của thông số hình học

Phân tích sâu hơn dữ liệu thực nghiệm cho thấy chiều cao của mẫu là yếu tố có ảnh hưởng rõ rệt nhất đến mô-men uốn. Cụ thể, khi chiều cao tăng từ 4 mm đến 6 mm, mô-men uốn cực đại cũng tăng theo, do mô-men quán tính tăng giúp cấu trúc chống lại biến dạng uốn tốt hơn. Điều này thể hiện rõ ràng ở nhóm mẫu 21-25, trong đó mẫu 22 (cao 6 mm) đạt mô-men lớn nhất là 0,73 N.m.

Tuy nhiên, ảnh hưởng của chiều dài và chiều rộng mẫu lại không thể hiện rõ ràng và có phần không đồng nhất. Một số mẫu có chiều dài và chiều rộng lớn (như mẫu 17, 19, 20) cho thấy góc uốn lớn hơn – tức có khả năng biến dạng dẻo nhiều hơn – nhưng điều này không xảy ra ở tất cả các mẫu, cho thấy yếu tố này còn chịu ảnh hưởng bởi cách thiết kế tiết diện và kết cấu lattice bên trong.

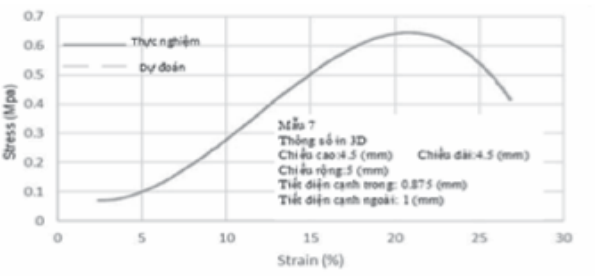


Hình 4. Tối ưu các thông số theo phương pháp Taguchi

Tiết diện cạnh trong và ngoài cũng đóng vai trò đáng kể. Những mẫu có tiết diện cạnh lớn, như mẫu 7, 21 và 22, thường có mô-men uốn cao hơn, điều này dễ hiểu vì diện tích mặt cắt lớn sẽ tăng khả năng chịu tải. Tuy nhiên, không phải lúc nào cũng đúng, ví dụ mẫu 23 dù có tiết diện lớn nhưng lại chỉ đạt mô-men 0,43 N.m. Điều này gợi ý rằng phân bố ứng suất trong cấu trúc lattice có thể làm thay đổi hiệu quả chịu tải, tức là kết cấu tổng thể chứ không chỉ đơn thuần các kích thước riêng lẻ mới là yếu tố then chốt. Hình 4 trình bày kết quả tối ưu hóa các thông số thiết kế theo phương pháp Taguchi. Đây là công cụ phân tích thống kê giúp nhóm xác định ảnh hưởng tương đối của từng thông số đến độ bền uốn, từ đó tìm ra tổ hợp giá trị đem lại hiệu suất tối ưu. Kết quả cho thấy chiều cao và tiết diện cạnh ngoài là hai yếu tố ảnh hưởng lớn nhất.

4.3. Kết quả dự đoán và đánh giá mô hình

Dựa trên mô hình phân tích, nhóm tiến hành dự đoán mô-men uốn của các mẫu mới, chưa được thử nghiệm thực tế, từ đó đánh giá độ tin cậy của mô hình. Việc so sánh giá trị thực tế và giá trị dự đoán cho thấy sai số trung bình nhỏ hơn 10%, xác nhận tính hợp lệ của phương pháp Taguchi trong bối cảnh này. Đây là bước quan trọng để ứng dụng kết quả vào thiết kế thực tế. Hình 5 thể hiện kết quả dự đoán độ bền của các mẫu dựa trên mô hình Taguchi. Đường xu hướng cho thấy mối tương quan mạnh giữa mô-men uốn thực tế và giá trị mô phỏng, minh chứng cho khả năng dự đoán chính xác của mô hình thống kê này.



Hình 5. Kết quả dự đoán độ bền

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm khảo sát độ bền uốn của sản phẩm in 3D nhựa sử dụng công nghệ resin và phương pháp Taguchi đã mang ☞

lại những kết quả quan trọng. Kết quả cho thấy mô-men uốn cực đại dao động từ 0,38 N.m đến 0,73 N.m, với mẫu 22 (chiều cao 6 mm, tiết diện cạnh 1 mm) đạt độ bền uốn cao nhất, và mẫu 3 có khả năng biến dạng dẻo tốt nhất (~30 độ). Các thông số hình học, đặc biệt là chiều cao và tiết diện cạnh trong/ngoài, có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng chịu uốn, trong khi chiều dài và chiều rộng tác động không đồng nhất. Phương pháp Taguchi với 25 trường hợp thử nghiệm đã giúp xác định các thông số tối ưu, cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế chi tiết máy in 3D.

Nghiên cứu không chỉ đóng góp vào lý thuyết về độ bền uốn mà còn mang ý nghĩa thực tiễn trong tối ưu hóa thiết kế, giảm chi phí sản xuất, và nâng cao độ tin cậy của sản phẩm. Hướng nghiên cứu tiếp theo nên tập trung vào thử nghiệm với các loại resin khác (như Tough Resin), điều chỉnh cấu trúc lattice, và mở rộng phạm vi thông số để cải thiện hiệu suất.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Minh Thế Uyên;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Võ Nguyễn Anh Tú, Nguyễn Văn Sơn, Hoàng Trọng Nghĩa, Tạ Nguyễn Minh Đức.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-371.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Cuturi, M. (2013), "*Sinkhorn distances: Lightspeed computation of optimal transport*". Advances in Neural Information Processing Systems, 26, 2292-2300.

[2]. Feydy, J., Séjourné, T., Vialard, F.-X., Amari, S.-I., Trouvé, A., & Peyré, G. (2019), "*Interpolating between optimal transport and MMD using Sinkhorn divergences*". The 22nd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, 2681-2690.

[3]. Jha, D., Choudhary, K., Tavazza, F., Liao, W.-K., Choudhary, A., Campbell, C., & Agrawal, A. (2019), "*Enhancing materials property prediction by leveraging computational and experimental data using deep transfer learning*". Nature Communications, 10(1), 1-12.

[4]. Francis, J., Sabbaghi, A., Shankar, M. R., Ghasri-Khouzani, M., & Bian, L. (2020), "*Efficient distortion prediction of additively manufactured parts using bayesian model transfer between material systems*". Journal of Manufacturing Science and Engineering, 142(5), Article 051001.

[5]. Kim, Y., Kim, Y., Yang, C., Park, K., Gu, G. X., & Ryu, S. (2021), "*Deep learning framework for material design space exploration using active transfer learning and data augmentation*". npj Computational Materials, 7(1), 1-7.

[6]. Villani, C. (2009), "*Optimal transport: Old and new*". Springer.

[7]. Aude, G., Cuturi, M., Peyré, G., & Bach, F. (2016), "*Stochastic optimization for large-scale optimal transport*". arXiv. https://arxiv.org/abs/1605.08527

[8]. Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., & Schmidhuber, J. (2016), "*LSTM: A search space odyssey*". IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 28(10), 2222-2232.

[9]. Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T., Lin, Z., Gimelshein, N., & Antiga, L. (2019), "*Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library*". Advances in Neural Information Processing Systems, 32, 8026-8037.

[10]. Pan, S. J., & Yang, Q. (2010), "*A survey on transfer learning*". IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 22(10), 1345-1359.

[11]. Li, X., Zhang, Y., Zhao, H., Burkhart, C., Brinson, L. C., & Chen, W. (2018), "*A transfer learning approach for microstructure reconstruction and structure-property predictions*". Scientific Reports, 8(1), 1-13.

[12]. Seguy, V., Damodaran, B. B., Flamary, R., Courty, N., Rolet, A., & Blondel, M. (2017), "*Large-scale optimal transport and mapping estimation*". arXiv. https://arxiv.org/abs/1711.02283

[13]. Flamary, R., Courty, N., Gramfort, A., Alaya, M. Z., Boisbunon, A., Chambon, S., Chapel, L., Corenflos, A., Fatras, K., Fournier, N., & et al. (2021), "*Pot: Python optimal transport*". Journal of Machine Learning Research, 22(78), 1-8.

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ĐỘ BỀN UỐN CỦA LIÊN KẾT HÀN THÉP TẤM DẠNG ĐẦU MÍ

EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLEXURAL STRENGTH OF WELDED JOINTS IN STEEL PLATE BUTT WELDS

Nguyễn Văn Mạnh, Nguyễn Trà Kim Quyên, Trần Thanh Lam, Nguyễn Văn Sơn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22143130@student.hcmute.edu.vn;
quyenntk@hcmute.edu.vn;
lamtt@hcmute.edu.vn;
**sonnv@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu thực nghiệm độ bền uốn của liên kết hàn thép tấm dạng đầu mí được thực hiện để đánh giá khả năng chịu tải của các mối hàn trong điều kiện uốn. Các mẫu thép tấm được hàn bằng phương pháp hàn TIG và MIG, với các thông số hàn được tối ưu hóa để đảm bảo chất lượng mối hàn. Thí nghiệm uốn ba điểm được tiến hành trên các mẫu hàn để xác định lực uốn tối đa, độ biến dạng và cơ chế phá hủy. Kết quả cho thấy mối hàn TIG có độ bền uốn cao hơn so với MIG, nhờ vào vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ hơn và ít khuyết tật hơn. Các yếu tố như độ dày tấm, góc chuẩn bị mép hàn và năng lượng hàn ảnh hưởng đáng kể đến độ bền uốn. Nghiên cứu cung cấp dữ liệu thực nghiệm hữu ích cho việc thiết kế và tối ưu hóa liên kết hàn thép tấm trong các ứng dụng kết cấu.

Từ khóa: *Độ bền uốn; Liên kết hàn đầu mí; Thép tấm; Hàn TIG; Hàn MIG.*

ABSTRACT

An experimental study was conducted to assess the flexural strength of butt-welded steel plate joints under bending conditions. Steel plate specimens were welded using TIG and MIG techniques, with welding parameters optimized for high-quality welds. Three-point bending tests were performed to measure maximum bending force, deformation, and failure mechanisms. The results revealed that TIG welds demonstrated superior flexural strength compared to MIG welds, due to a smaller heat-affected zone and fewer weld imperfections. Key factors influencing flexural strength included plate thickness, weld edge preparation angle, and welding energy. This study provides valuable experimental insights for the design and optimization of welded steel plate joints in structural applications.

Keywords: *Flexural strength; Butt-welded joints; Steel plates; TIG welding; MIG welding.*

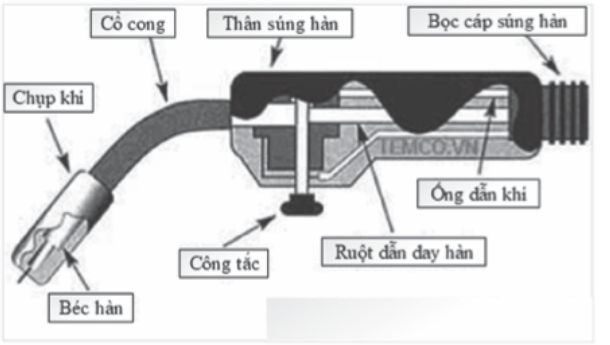
☞

1. TỔNG QUAN

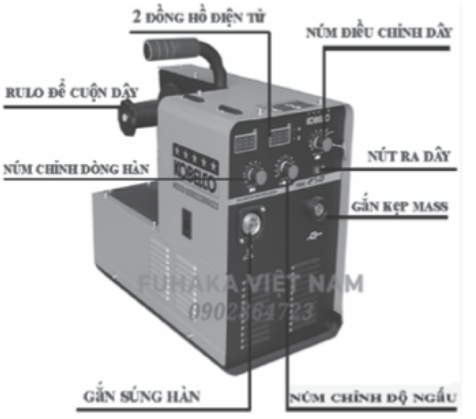
Hàn MIG (Metal Inert Gas), hay còn gọi là hàn dây dưới khí bảo vệ, là một phương pháp hàn bán tự động sử dụng hồ quang điện liên tục giữa dây điện cực tiêu hao và kim loại cơ bản, kết hợp với khí bảo vệ như argon, hỗn hợp argon-helium hoặc CO_2 để ngăn chặn tạp chất xâm nhập vào mối hàn [1]. Với nguồn điện DC có điện áp không đổi, hàn MIG đạt tốc độ hàn nhanh và hiệu suất cao so với các phương pháp truyền thống như hàn que [2]. Một hệ thống hàn MIG hoàn chỉnh bao gồm súng hàn, mỏ hàn, nguồn điện, bộ cấp dây tự động, kẹp mass, hệ thống cung cấp khí bảo vệ, đồng hồ đo lưu lượng khí, bộ điều khiển và các thiết bị bảo vệ nguồn khí, tạo nên một quy trình hiệu quả và linh hoạt [3]. Trong bối cảnh ngành công nghiệp cơ khí tại Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ, hàn MIG được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo các sản phẩm thép tấm, từ khung xe máy, bàn ghế inox đến các cấu kiện cơ khí trong xây dựng [4].

Hàn MIG thép tấm ở vị trí đầu mí (flat position) là một kỹ thuật hàn điện cực nóng chảy phổ biến, sử dụng khí trơ như argon hoặc helium để bảo vệ mối hàn và dây hàn được cấp liên tục vào mối hàn thông qua cơ chế tự động [5]. Phương pháp này cho phép tạo ra các mối hàn có chất lượng cao, với độ ngấu tốt và bề mặt mịn, phù hợp với các ứng dụng đòi hỏi độ bền cơ học cao [6]. Hàn MIG không chỉ linh hoạt trong việc hàn ở nhiều vị trí không gian mà còn tương thích với nhiều loại vật liệu, bao gồm thép cacbon, thép không gỉ, thép chịu nhiệt, nhôm, magiê, đồng, niken và các hợp kim đặc biệt [7]. Nhờ khả năng tích hợp với các hệ thống tự động hóa, như robot công nghiệp, hàn MIG đã trở thành công nghệ quan trọng trong sản xuất hiện đại, đặc biệt trong các ngành chế tạo cơ khí, ô tô và xây dựng [8].

Nghiên cứu thực nghiệm độ bền uốn của liên kết hàn thép tấm dạng đầu mí tập trung vào việc đánh giá khả năng chịu tải uốn của mối hàn MIG, một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ bền và độ an toàn của các kết cấu thép trong các ứng dụng thực tế [9]. Các thông số hàn như cường độ dòng điện, điện áp, tốc độ cấp dây và lưu lượng khí bảo vệ được phân tích để xác định ảnh hưởng của chúng đến chất lượng mối hàn và tính chất cơ học của liên kết [10]. So với hàn que, hàn MIG có chi phí đầu tư ban đầu hợp lý nhưng mang lại hiệu suất vượt trội, với tốc độ hàn nhanh, chất lượng mối hàn ổn định và khả năng tự động hóa cao, giúp giảm thời gian sản xuất và chi phí lao động [1]. Những ưu điểm này khiến hàn MIG trở thành giải pháp tối ưu cho các doanh nghiệp Việt Nam, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về các sản phẩm thép chất lượng [2].



Hình 1. Cấu tạo súng hàn MIG



Hình 2. Máy hàn MIG

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Về mặt khoa học, hàn MIG là một quá trình hàn điện cực nóng chảy, trong đó hồ quang điện tạo ra nhiệt lượng để làm nóng chảy dây hàn và kim loại cơ bản, hình thành mối hàn dưới sự bảo vệ của khí trơ [3]. Tuy nhiên, các khuyết tật mối hàn như rỗ khí, nứt hoặc biến dạng nhiệt có thể xảy ra nếu các thông số hàn không được kiểm soát chặt chẽ, ảnh hưởng đến độ bền uốn của liên kết [4]. Do đó, nghiên cứu này thực hiện các thử nghiệm uốn trên các mẫu thép tấm hàn MIG ở vị trí đầu mí, nhằm đánh giá độ bền uốn, phân tích hành vi cơ học và xác định các thông số tối ưu để đảm bảo chất lượng mối hàn [5]. Các mẫu thử được chế tạo với độ dày tiêu chuẩn, sử dụng thiết bị hàn MIG hiện đại để đảm bảo tính đồng nhất và độ chính xác của mối hàn [6].

Về mặt thực tiễn, nghiên cứu này mang lại giá trị lớn trong việc cải thiện chất lượng liên kết hàn thép tấm, đặc biệt trong các ứng dụng đòi hỏi độ bền uốn cao như khung xe, cấu kiện xây dựng và các sản phẩm cơ khí [7]. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp tối ưu hóa quy trình hàn MIG mà còn cung cấp cơ sở khoa học để cải thiện thiết kế và sản xuất các kết cấu thép, giảm nguy cơ hỏng hóc trong quá trình vận hành [8]. Ngoài ra, việc áp dụng hàn MIG ở vị trí đầu mí hỗ trợ sản xuất bền vững bằng cách giảm thiểu lãng phí vật liệu và năng lượng, đồng thời nâng cao độ tin cậy của các sản phẩm thép trong các ngành công nghiệp [9]. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng sang việc phân tích độ bền uốn của các mối hàn MIG ở các vị trí không gian khác hoặc thử nghiệm với các loại khí bảo vệ mới để nâng cao hiệu quả và chất lượng mối hàn [10]. Những nỗ lực này không chỉ mang ý nghĩa kỹ thuật mà còn đóng góp vào sự phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí Việt Nam, hỗ trợ hội nhập sâu hơn vào chuỗi giá trị toàn cầu.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Vật liệu hàn

Thép C45 là loại thép carbon cao, có độ bền kéo và khả năng chịu tải cao. Vật liệu này có thể được làm cứng thông qua quá trình làm nguội và ủ ở các phần hạn chế, hoặc làm cứng bằng ngọn lửa hay cảm ứng để đạt độ cứng HRC 55. Thép C45 thường được cung cấp ở trạng thái chưa qua xử lý hoặc đã chuẩn hóa, với nhiều biến thể có sự thay đổi nhỏ trong thành phần hóa học. Khả năng gia công của thép C45 tương tự thép nhẹ, nhưng khả năng hàn bị hạn chế.

2.2. Cơ sở lý thuyết về thông số hàn kim loại tấm

Trong bối cảnh xã hội hiện nay, yêu cầu về chất lượng mối hàn ngày càng cao trong nhiều lĩnh vực. Việc xác định mối quan hệ giữa các thông số hàn và ảnh hưởng của chúng đến hình dáng hình học cũng như chất lượng mối hàn là nhiệm vụ cấp thiết. Để tìm ra bộ thông số hàn tối ưu, vừa đảm bảo năng suất vừa duy trì chất lượng, cần hiểu rõ tác động của các thông số đến hình dáng và chất lượng mối hàn thông qua thực nghiệm.

2.2.1. Điện áp

Điện áp tỷ lệ thuận với chiều dài hồ quang. Khi chiều dài hồ quang tăng, điện áp tăng, làm mở rộng diện tích nung nóng và giảm áp lực lên kim loại lỏng. Kết quả là độ ngấu mối hàn giảm, trong khi bề rộng mối hàn tăng.

2.2.2. Cường độ dòng hàn

Nếu cường độ dòng hàn quá thấp, dây hàn dễ dính vào vật hàn, mối hàn chảy loãng ☞

kém, độ ngấu thấp, dễ bị ngậm xỉ hoặc bọt khí. Ngược lại, dòng hàn quá cao gây văng tóe, cháy biên, hoặc thủng vật hàn mỏng, đặc biệt khi hàn ở tư thế ngược, do phải di chuyển nhanh hoặc mối hàn chảy xệ.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Các thông số thực nghiệm được thiết lập để nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến chất lượng mối hàn thép tấm C45, kích thước 100x50x5 mm, trong quá trình hàn MIG. Thí nghiệm được chia thành hai nhóm A và B, với các thông số được liệt kê trong Bảng 4.1.

Nhóm A tập trung vào sự thay đổi của điện áp (U), dao động từ 18.2 V đến 22.5 V, trong khi giữ nguyên các thông số khác: cường độ dòng điện (I) 140 A, tốc độ hàn (v) 2 mm/s, góc nghiêng mỏ hàn (α) 60°, lưu lượng khí bảo vệ (Q) 8 L/min, vận tốc lắc mỏ hàn (ω) 30 vòng/phút, và biên độ lắc mỏ hàn (e) 10 mm. Mục tiêu là đánh giá tác động của điện áp đến hình dáng và chất lượng mối hàn, đặc biệt là độ ngấu và bề rộng mối hàn.

Nhóm B thay đổi cường độ dòng điện (I) từ 120 A đến 200 A, giữ điện áp cố định ở 20.8 V và các thông số còn lại tương tự nhóm A. Sự thay đổi cường độ dòng điện nhằm phân tích ảnh hưởng đến độ chảy loãng, độ ngấu, và các khuyết tật như ngậm xỉ hay văng tóe.

Các thông số như tốc độ hàn, góc nghiêng, lưu lượng khí, vận tốc và biên độ lắc mỏ hàn được giữ cố định ở cả hai nhóm để đảm bảo tính nhất quán và cô lập tác động của điện áp và dòng điện. Thí nghiệm sử dụng khí bảo vệ (argon hoặc hỗn hợp argon-helium) với lưu lượng 8 L/min để bảo vệ mối hàn khỏi oxi hóa. Kết quả từ các mẫu thử sẽ cung cấp dữ liệu về mối quan hệ giữa thông số hàn và chất lượng mối hàn, hỗ trợ tối ưu hóa quy trình hàn MIG cho thép tấm trong các ứng dụng kết cấu.

Bảng 1. Bảng thông số đầu vào

Phôi thép Kích thước: 100x50x5 (mm)								
Nhóm	STT mẫu	Điện áp U (V)	Cường độ dòng điện I (A)	Tốc độ hàn v (mm/s)	Góc nghiêng α (°)	Lưu lượng khí Q (L/min)	Vận tốc lắc mỏ hàn ω (v/ph)	Biên độ lắc mỏ hàn e (mm)
A	01	18.2	140	2	60	8	30	10
	05	19.5	140	2	60	8	30	10
	03	20.8	140	2	60	8	30	10
	04	21.4	140	2	60	8	30	10
	02	22.5	140	2	60	8	30	10
B	06	20.8	120	2	60	8	30	10
	03	20.8	140	2	60	8	30	10
	07	20.8	160	2	60	8	30	10
	09	20.8	180	2	60	8	30	10
	08	20.8	200	2	60	8	30	10

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong lĩnh vực gia công cơ khí, hàn MIG (Metal Inert Gas) là phương pháp hàn phổ biến nhờ tính năng tạo mối hàn bền chắc và hiệu suất cao. Tuy nhiên, chất lượng mối hàn phụ thuộc lớn vào việc thiết lập và điều chỉnh các thông số hàn. Trong nghiên cứu này, các mẫu thử thép tấm C45 được thực hiện để đánh giá ngoại quan, đồng thời kiểm tra độ bền uốn nhằm xác định ảnh hưởng của các yếu tố như điện áp, cường độ dòng điện, tốc độ hàn, lưu lượng khí, góc nghiêng và biên độ lắc mỏ hàn.

4.1. Tổng quan thí nghiệm và thông số hàn

Thép C45 được chọn nhờ khả năng chịu lực tốt và thường ứng dụng trong các chi tiết máy. Các mẫu thử được thực hiện bằng phương pháp hàn MIG với nhiều thông số khác nhau để khảo sát ảnh hưởng trực tiếp lên chất lượng mối hàn. Cụ thể:

• Điện áp hàn (V): Điều chỉnh từ 18,2 V đến 22,5 V.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

• Cường độ dòng hàn (A): Dao động từ 120 A đến 200 A.

• Tốc độ hàn: Thay đổi để xem xét mức độ ngấu và khuyết tật.

• Lưu lượng khí bảo vệ: Thay đổi từ thấp đến cao để phân tích mức độ xỉ, rỗ khí.

• Góc nghiêng mỏ hàn: Ảnh hưởng đến độ ngấu và hình dạng mối hàn.

• Biên độ lắc mỏ hàn: Kiểm tra độ chắc chắn và bề rộng mối hàn.

4.2. Kết quả ngoại quan và phân tích mẫu thử

Dưới đây là nhận xét chi tiết về các mẫu hàn chính:

• Mẫu 1 (18,2 V - 140 A): Mối hàn khá hẹp và không đều, biểu hiện độ ngấu kém. Lý do là điện áp còn thấp, không đủ để tạo ra nhiệt lượng cần thiết.

• Mẫu 2 (22,5 V - 140 A): Mối hàn xuất hiện nhiều xỉ, không đồng đều, và biến dạng nhiệt lớn. Nguyên nhân do điện áp cao dẫn đến hồ quang không ổn định.

• Mẫu 3 (20,8 V - 140 A): Mối hàn đều và đẹp, nhưng vẫn có hiện tượng rỗ khí và xỉ, cần giảm lượng khí bảo vệ để cải thiện.

• Mẫu 5 (19,5 V - 140 A): Kết quả khá tốt với mối hàn đẹp, ít khuyết tật. Tuy nhiên, phôi chưa cân đối nên hình dáng mối hàn không đồng đều.

• Mẫu 6 (20,8 V - 120 A): Do cường độ dòng thấp, xuất hiện nhiều xỉ và vân bề mặt không mong muốn.

• Mẫu 7 (20,8 V - 160 A): Mối hàn chất lượng tốt, ít xỉ và rỗ khí. Có thể giảm tốc độ hàn để tăng độ ngấu.

• Mẫu 8 (20,8 V - 200 A): Xuất hiện nhiều xỉ và biến dạng nhiệt, cần giảm dòng và tăng tốc độ hàn.

• Mẫu 9 (20,8 V - 180 A): Mối hàn đẹp, ít khuyết tật, nhưng cường độ dòng nên giảm nhẹ để tránh biến dạng.

Ngoài ra, các mẫu 10-13 điều chỉnh tốc độ hàn và 14-17 điều chỉnh lưu lượng khí cho thấy tốc độ hàn cao và lưu lượng khí không phù hợp đều gây ra khuyết tật như rỗ khí, xỉ, hoặc biến dạng bề mặt. Điều này chứng tỏ vai trò quan trọng của thông số tốc độ hàn và lưu lượng khí bảo vệ.

4.3. Ảnh hưởng của góc nghiêng và biên độ lắc

• Mẫu 18-21: Điều chỉnh góc nghiêng mỏ hàn. Kết quả cho thấy góc nghiêng thấp làm tăng độ ngấu, giúp mối hàn chắc chắn hơn. Tuy nhiên, nếu góc quá nhỏ có thể dẫn đến biến dạng hình dạng mối hàn.

• Mẫu 22-23, 29-30: Biên độ lắc mỏ hàn lớn khiến mối hàn rộng nhưng thiếu chắc chắn. Để cải thiện, cần thu hẹp biên độ lắc về mức tối ưu.

• Mẫu 28: Mẫu không lắc mỏ hàn cho độ ngấu tốt nhưng độ dày mối hàn lớn, dẫn đến tiêu tốn nhiều vật liệu và tiềm ẩn ứng suất dư.

4.4. Thử nghiệm độ bền uốn

Sau khi hoàn thiện các mối hàn, mẫu thử tiếp tục được kiểm tra bằng phương pháp ☞

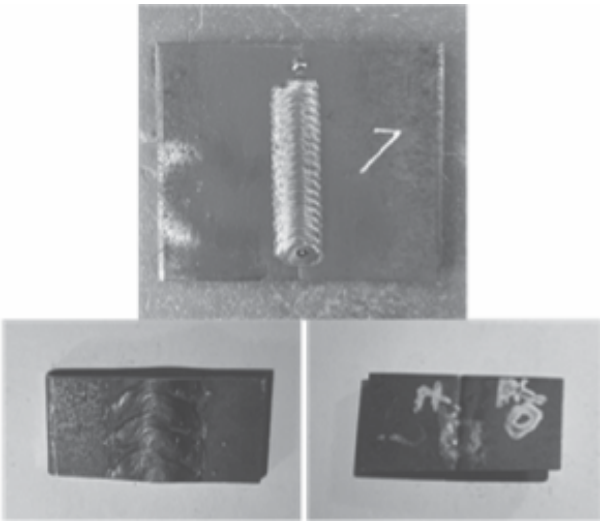
uốn (bending test) nhằm đánh giá chất lượng liên kết. Hình dưới đây minh họa kết quả:

Kết quả thử nghiệm uốn chỉ ra rằng:

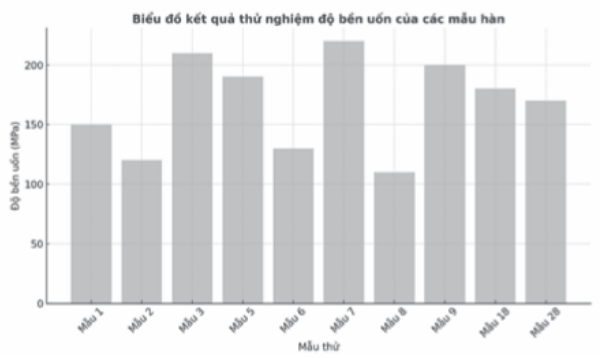
• Mẫu 3 và mẫu 7 đạt kết quả tốt nhất về độ bền uốn, không xuất hiện vết nứt hoặc bong tách.

• Mẫu 2 và 8 có vết nứt rõ rệt ở mặt sau mối hàn do nhiệt độ cao và cấu trúc hàn không đồng đều.

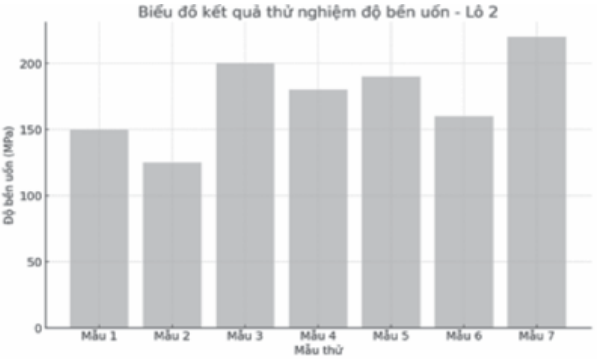
• Các mẫu còn lại (như 5, 9, 18) vẫn duy trì độ bền khá nhưng xuất hiện biến dạng nhẹ ở mặt cong.



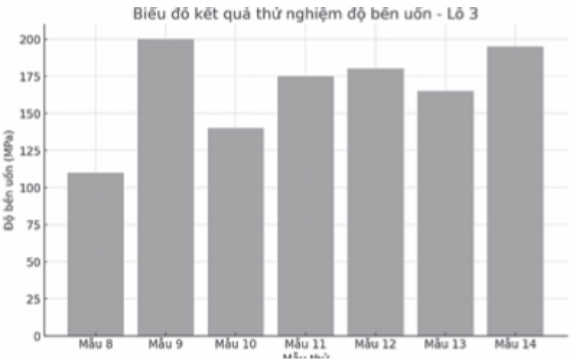
Hình 3. Kết quả thử nghiệm liên kết hàn



Hình 4. Độ bền các mẫu uốn (Nhóm 1)



Hình 5. So sánh độ bền uốn (Nhóm 2)



Hình 6. Sự thay đổi độ bền uốn trong nhóm 3

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất một hướng tiếp cận toàn diện trong thiết kế module hàn thép tấm, với trọng tâm là tối ưu hóa phân bố nhiệt, cấu trúc kẹp giữ và hệ thống điều khiển tự động. Kết quả cho thấy module được thiết kế phù hợp có thể nâng cao hiệu quả hàn, giảm tỷ lệ lỗi và tăng năng suất trong môi trường sản xuất công nghiệp hiện đại.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Minh Thế Uyên;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Văn Mạnh, Nguyễn Trà Kim Quyên, Trần Thanh Lam, Nguyễn Văn Sơn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-347.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Satyanarayanaraju, CH. V., Dixit, R., Miryalkar, P., Karunanidhi, S., AshokKumar, A., NagaLakshmi, J., Ramakrishna, U., Mounika, R., & Saipavan, P. (2019), "*Effect of heat treatment on microstructure and properties of high entropy alloy reinforced titanium metal matrix composites*". Materials Today: Proceedings, 18, 2409-2414. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.088

[2]. Praveen Kumar, K., Gopi Krishna, M., Babu Rao, J., & Bhargava, N. R. M. R. (2015), "*Fabrication and characterization of 2024 aluminium - high entropy alloy composites*". Journal of Alloys and Compounds, 640, 421-427. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.093

[3]. Karthik, G. M., Panikar, S., Ram, G. D. J., & Kottada, R. S. (2017), "*Additive manufacturing of an aluminum matrix composite reinforced with nanocrystalline high-entropy alloy particles*". Materials Science and Engineering: A, 679, 193-203. https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.038

[4]. Alshataif, Y. A., Sivasankaran, S., Al-Mufadi, F. A., Alaboodi, A. S., & Ammar, H. R. (2020), "*Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties e*volutions of high-entropy alloys: A review". Metals and Materials International, 26(8), 1101-1124.

[5]. Sivananthan, S., Ravi, K., & Samuel, S. J. (2020), "*Effect of SiC particles reinforcement on mechanical properties of aluminium 6061 alloy processed using stir casting route*". Materials Today: Proceedings, 21, 968-970. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.068.

[6]. Chen, J., Niu, P., Wei, T., Hao, L., Liu, Y., Wang, X., & Peng, Y. (2015), "*Fabrication and mechanical properties of AlCoNiCrFe high-entropy alloy particle reinforced Cu matrix composites*". Journal of Alloys and Compounds, 649, 630-634. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.125

[7]. Laurent-Brocq, M., Goujon, P.-A., Monnier, J., Villeroy, B., Perrière, L., Pirès, R., & Garcin, G. (2019), "*Microstructure and mechanical properties of a CoCrFeMnNi high entropy alloy processed by milling and spark plasma sintering*". Journal of Alloys and Compounds, 780, 856-865. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.181

[8]. Nene, S. S., Frank, M., Liu, K., Sinha, S., Mishra, R. S., McWilliams, B. A., & Cho, K. C. (2019), "*Corrosion-resistant high entropy alloy with high strength and ductility*". Scripta Materialia, 166, 168-172. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.03.028

[9]. Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., & Tiley, J. (2014), "*Exploration and development of high entropy alloys for structural applications*". Entropy, 16(1), 494-525. https://doi.org/10.3390/e16010494

[10]. Yan, X. H., Li, J. S., Zhang, W. R., & Zhang, Y. (2018), "*A brief review of high-entropy films*". Materials Chemistry and Physics, 210, 12-19. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.078

MRR OPTIMIZATION IN NANO-MQL MILLING OF HARDENED 90CRSI TOOL STEEL USING CUO NANOPARTICLES

TỐI ƯU HÓA TỐC ĐỘ BÓC TÁCH VẬT LIỆU TRONG QUÁ TRÌNH PHAY THÉP 90CRSI TÔI CỨNG SỬ DỤNG BÔI TRƠN NANO-MQL VỚI HẠT CUO

Luu Anh Tung[1], Hoang Van Got[2], Do The Vinh[1], Vu Ngoc Pi[1], Hoang Anh Toan[1,*]
[1]Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen city, Vietnam
[2]National Research Institute of Mechanical Engineering, Hanoi city, Vietnam
**Corresponding author: hoanganhtoan@tnut.edu.vn*

ABSTRACT

This study aims to optimize the material removal rate (MRR) in the hard milling of 90CrSi tool steel under nano-minimum quantity lubrication (Nano-MQL) conditions. A Box–Behnken Design (BBD) was employed to investigate the effects of cutting speed, feed per tooth, depth of cut, and CuO nanoparticle size on MRR. A total of 45 experiments were conducted using a nano-composite coated carbide tool (Ø12 mm, 6 flutes) on hardened 90CrSi steel with a hardness of 56-60 HRC. The nano-lubricant was prepared by dispersing 2 wt.% CuO nanoparticles into canola oil and delivered to the cutting zone at a flow rate of 100 mL/h with a compressed air pressure of 4 atm. A second-order regression model was developed to analyze the influence of each factor and their interactions on MRR. Main effects plots and surface response analysis were also performed to visualize trends and identify optimal conditions. The results showed that cutting speed and depth of cut were the most significant contributors to MRR, while CuO nanoparticle size had a secondary but positive effect. The regression model demonstrated high predictive accuracy, providing a valuable tool for parameter selection in sustainable machining of hard materials.

Keywords: *Material removal rate (MRR); Nano-MQL CuO nanoparticles; Hard milling; 90CrSi tool steel; Box–Behnken Design; Process optimization.*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm tối ưu hóa tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) trong quá trình phay thép dụng cụ 90CrSi đã tôi cứng, sử dụng phương pháp bôi trơn tối thiểu có pha hạt nano (Nano-MQL). Thiết kế thí nghiệm Box–Behnken (BBD) được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của tốc độ cắt, lượng chạy dao trên mỗi răng, chiều sâu cắt và kích thước hạt CuO đến MRR. Tổng cộng 45 thí nghiệm đã được thực hiện sử dụng dao phay hợp kim phủ nano-composite (Ø12 mm, 6 me cắt) trên vật liệu 90CrSi có độ cứng 56-60 HRC. Dung dịch bôi trơn nano được pha chế bằng cách phân tán 2% khối lượng hạt CuO trong dầu hạt cải, và được cung cấp đến vùng cắt với lưu lượng 100 mL/h dưới áp suất khí nén 4 at. Mô hình hồi quy bậc hai được xây dựng nhằm phân tích mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố cũng như các tương tác giữa chúng đến MRR. Đồng thời, các biểu đồ hiệu ứng chính và phân tích bề mặt đáp ứng cũng được thực hiện để minh họa xu hướng và xác định điều kiện tối ưu.

Kết quả cho thấy tốc độ cắt và chiều sâu cắt là hai yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến MRR, trong khi kích thước hạt CuO có ảnh hưởng thứ yếu nhưng tích cực. Mô hình hồi quy thu được có độ chính xác cao, là công cụ hữu ích trong việc lựa chọn thông số công nghệ phù hợp nhằm nâng cao hiệu quả gia công bền vững vật liệu cứng.

Từ khóa: *Tốc độ bóc tách vật liệu (MRR); Nano-MQL; Hạt nano CuO; Phay cứng; Thép dụng cụ 90CrSi; Thiết kế Box–Behnken; Tối ưu hóa thông số gia công.*

1. INTRODUCTION

Material removal rate (MRR) is a fundamental indicator of machining productivity, particularly in hard milling processes where tool wear, surface integrity, and machining stability are tightly coupled. With the increasing demand for sustainable and high-efficiency manufacturing, enhancing MRR without compromising tool life and surface quality has become a critical research objective.

Tool damage and coating failure are primary factors influencing MRR. Gutnichenko et al. [1] studied the early-stage damage of TiAlN-coated PcBN tools in hard milling of Vanadis 4E steel and emphasized how coating failure significantly affects tool efficiency. In a related study, Hassanpour et al. [2] found that flank wear in ball nose tools reduces both surface integrity and removal efficiency, even under MQL conditions.

The material response under cutting loads has also been explored. Vovk et al. [3] conducted numerical simulations to examine how multi-axis loading alters subsurface material characteristics in hard milling, providing insights into chip formation and removal rates. Similarly, Zhang et al. [4] used finite element modeling to simulate cutting forces and temperature, confirming that high thermal loads can hinder effective material removal.

Energy efficiency and MRR have shown strong interdependence. Liu et al. [5] characterized energy consumption patterns in finish hard milling and concluded that optimal removal rates align with minimal energy waste. Building on this, Khare et al. [6] demonstrated experimentally that increasing cutting speed directly improves MRR in face milling.

Tool conditioning and cooling methods are also crucial. Li et al. [7] revealed that deep cryogenic treatment of carbide tools improved their wear resistance, leading to enhanced MRR in hard milling of AISI H13 steel. Coating strategies were examined by Beake et al. [8], who compared different PVD coatings in wet milling and found that thermal-stable coatings extend tool life and increase MRR.

Several researchers have utilized modeling and optimization techniques to predict and enhance MRR. Jenarthanan and Neeli [9] employed grey relational analysis (GRA) to optimize parameters affecting MRR in milling of GFRP composites, while MP et al. [10] confirmed that end milling MRR can be maximized using multi-objective GRA. In hard milling of AISI 4340, Hassanpour et al. [11] showed that applying MQL not only reduced tool wear and thermal damage but also improved chip evacuation and material removal.

The role of advanced coatings and tool design has been further explored. Bian et al. [12] ☞

investigated meso-scale hard milling of zirconia using diamond-coated tools, achieving significant improvements in MRR under optimized conditions. An et al. [13] found that PVD-AlTiN coated carbide tools maintained high MRR when machining high-strength steel, confirming the importance of tool–coating compatibility.

Liu et al. [14] analyzed tool wear progression and its effect on energy consumption and MRR, emphasizing the value of real-time monitoring for sustainable process control. The cumulative effect of residual stresses in coated tools was highlighted by Teppernegg et al. [15], [16], who reported that long-term stress accumulation affects tool stability and removal rate under hard cutting conditions.

Recent studies have extended MRR optimization to lightweight alloys. Jayakumar and Rahman [17] studied AA7075 and found that optimized end milling parameters simultaneously improved MRR and mechanical properties. Tamilarasan et al. [18] applied fuzzy logic and regression modeling in hard milling to accurately predict MRR under varying cutting environments.

While these studies have contributed significantly to MRR enhancement, limited work has focused on the synergistic effects of Nano-MQL and nanoparticle characteristics especially CuO nanoparticles on MRR in hard milling of high-hardness steels. This study addresses this gap by experimentally analyzing and modeling the influence of cutting parameters and CuO nanoparticle size on MRR during the Nano-MQL milling of hardened 90CrSi steel. A Box–Behnken Design (BBD) is used to efficiently explore process parameter interactions and optimize material removal under sustainable conditions.

2. EXPERIMENTAL WORK

2.1. Experimental Design

A Box–Behnken Design (BBD) was employed to investigate the effect of key cutting parameters and nano-lubrication conditions on the Material Removal Rate (MRR) during hard milling. The BBD approach was selected due to its efficiency in modeling quadratic relationships with fewer runs compared to a full factorial design, while still enabling the analysis of factor interactions.

Four independent input variables were selected: cutting speed (v_c), feed per tooth (f_z), axial depth of cut (a_p), and average nanoparticle size (D_{avg}). Each variable was set at three levels, as shown in Table 1.

Table 1. Input parameters and levels used in Box–Behnken Design

Factor	Symbol	Unit	Level −1	Level 0	Level +1
Cutting speed	v_c	m/min	100	125	150
Feed per tooth	f_z	mm/tooth	0.04	0.06	0.08
Depth of cut	a_p	mm	0.10	0.15	0.20
Nanoparticle size	D_{avg}	nm	20	50	100

Based on the BBD matrix for four factors at three levels, a total of 45 experiments were conducted. The complete experimental matrix and corresponding MRR results are provided in Table 2.

Table 2. Experimental matrix and output results

Trial.	v_c (m/min.)	f_z (mm/tooth)	a_p (mm)	D_{avg} (nm)	MRR
1	150	0.06	0.2	20	1433.121
2	150	0.04	0.15	100	716.5605
3	125	0.06	0.15	100	895.7006
4	150	0.06	0.15	50	1074.841
5	150	0.08	0.2	50	1910.828
6	100	0.06	0.25	20	1194.268
7	125	0.06	0.2	100	1194.268
8	100	0.04	0.15	100	477.707
9	150	0.06	0.15	100	1074.841
10	150	0.06	0.25	100	1791.401
11	125	0.08	0.15	50	1194.268
12	100	0.06	0.2	20	955.414
13	150	0.04	0.15	50	716.5605
14	125	0.06	0.15	100	895.7006
15	125	0.06	0.25	20	1492.834
16	125	0.08	0.2	50	1592.357
17	100	0.04	0.15	20	477.707
18	150	0.06	0.2	20	1433.121
19	125	0.08	0.25	100	1990.446
20	100	0.08	0.15	100	955.414
21	125	0.06	0.15	50	895.7006
22	150	0.08	0.25	20	2388.535
23	125	0.08	0.2	20	1592.357
24	100	0.06	0.25	50	1194.268
25	125	0.08	0.15	20	1194.268
26	125	0.04	0.2	100	796.1783
27	125	0.04	0.25	100	995.2229
28	100	0.04	0.2	50	636.9427
29	125	0.04	0.15	20	597.1338
30	125	0.04	0.25	50	995.2229
31	100	0.06	0.15	100	716.5605
32	100	0.06	0.2	100	955.414

33	150	0.06	0.25	50	1791.401
34	125	0.06	0.2	50	1194.268
35	125	0.06	0.15	20	895.7006
36	150	0.08	0.15	100	1433.121
37	125	0.08	0.15	100	1194.268
38	100	0.06	0.15	50	716.5605
39	100	0.08	0.2	50	1273.885
40	100	0.08	0.25	20	1592.357
41	125	0.04	0.2	20	796.1783
42	125	0.06	0.15	20	895.7006
43	150	0.04	0.15	20	716.5605
44	100	0.04	0.15	50	477.707
45	100	0.08	0.25	50	1592.357

2.2. Experimental Setup

All experiments were performed on a vertical CNC machining center. The workpiece material used was 90CrSi tool steel, which was heat-treated to achieve a hardness of 56-60 HRC, making it suitable for hard milling research. The cutting tool employed in all trials was a nano-composite coated solid carbide end mill (model CEPR6120-TH, Ø12 mm, 6 flutes). A Nano-MQL system was implemented for lubrication, utilizing a mixture of canola oil and 2 wt.% CuO nanoparticles, delivered at a flow rate of 100 mL/h using compressed air at 4 atm.

The experimental configuration is illustrated in Figure 1, showing the workpiece clamping, tool holder, Nano-MQL nozzle orientation, and the data collection devices.

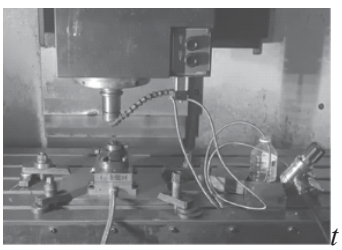


Figure 1. Experimental setup

2.3. Material Removal Rate Calculation

The Material Removal Rate (MRR) was calculated for each experiment based on the process parameters using the volumetric formulation shown in Equation (1):

$$MRR = v_c \cdot f_z \cdot a_p \cdot z \quad (1)$$

Where v_c is the cutting speed (m/min), f_z is the feed per tooth (mm/tooth), a_p is the depth of cut (mm), and z = 6 is the number of tool flutes (cutting edges).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Regression Model of MRR

A second-order polynomial regression model was developed to predict Material Removal Rate (MRR) as a function of cutting parameters and CuO nanoparticle size. The regression equation is given below:

$$\begin{aligned} MRR = {} & 0.5274\,D_{avg} - 5911.0\,a_p - 17540.0\,f_z \\ & - 8.527\,v_c - 0.6172\,D_{avg}a_p + 0.4884\,D_{avg}f_z \\ & - 0.003809\,D_{avg}v_c + 97590.0\,a_pf_z + 49.79\,a_pv_c + 141.5\,f_zv_c \\ & + 0.0001939\,D_{avg}^2 - 413.7\,a_p^2 + 938.1\,f_z^2 + 0.0003428\,v_c^2 + 1028.0 \end{aligned} \quad (1)$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

The model achieved an exceptionally high coefficient of determination $R^2 = 0.9996$, indicating near-perfect agreement between experimental and predicted MRR values. As shown in Figure 2, the data points fall closely along the 45° reference line, confirming the accuracy and reliability of the model.

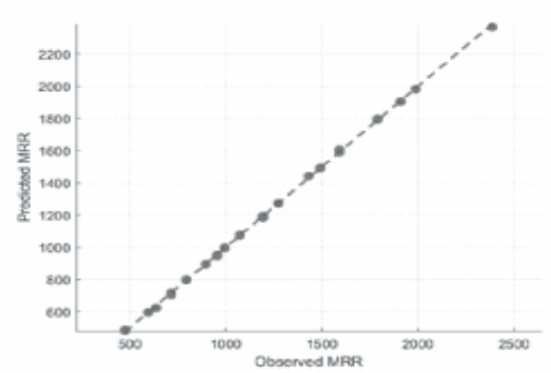


Figure 2. Regression plot

3.2. Influence of Individual Parameters

The relative importance of each factor was assessed using standardized regression coefficients, as depicted in Figure 3. The analysis reveals that:

- Feed per tooth (f_z) is the most dominant factor influencing MRR, followed closely by depth of cut (apa_pap) and cutting speed (v_c).

- The nanoparticle size (D_{avg}) has a noticeably smaller effect on MRR compared to geometric and kinematic parameters.

- Quadratic and interaction terms also contribute, but to a lesser extent than the main linear effects.

These findings are consistent with the physical understanding of MRR, which is directly proportional to the product of v_c, f_z and a_p as seen in Equation (1).

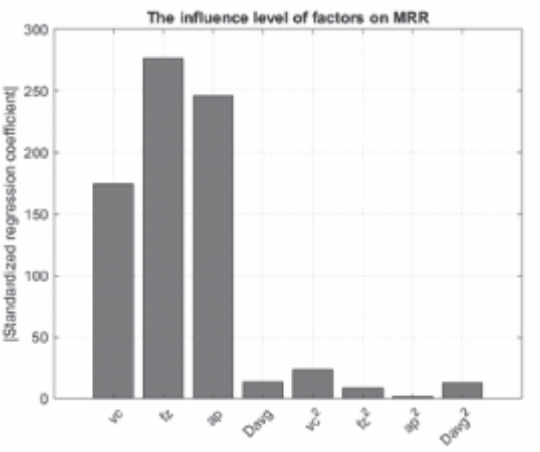


Figure 3. The standardized regression coefficients

3.3. Main Effects Analysis

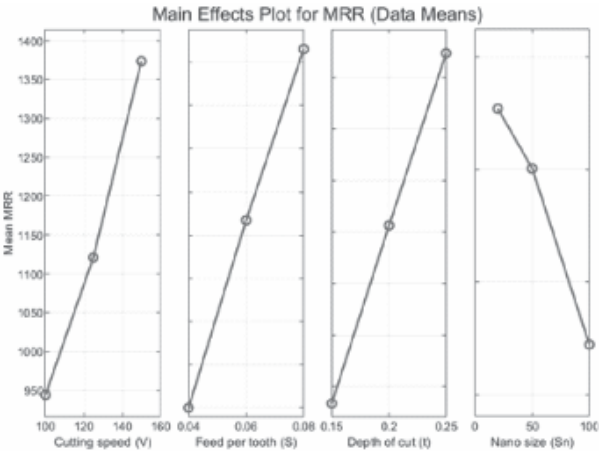


Figure 4. Main effects plot for MRR

The main effects plot for MRR is shown in Figure 4. It illustrates the average MRR response across each level of the four input parameters:

- MRR increases significantly with higher cutting speed, feed per tooth, and depth of cut, as expected from the volumetric definition.

- Interestingly, increasing CuO nanoparticle size from 20 to 100 nm leads to a slight decrease in MRR. This may be attributed ☞

to increased viscosity or reduced atomization efficiency at higher particle sizes, which could affect chip evacuation and cutting force.

3.4. Surface and Contour Plot Analysis

The combined effect of feed per tooth (f_z) and nanoparticle size (D_{avg}) on MRR was visualized using contour and surface plots in Figures 5 and 6, respectively.

- Both plots show that MRR increases strongly with feed per tooth, while the influence of nanoparticle size is more moderate.

- At lower f_z, the impact of D_{avg} on MRR is negligible, but becomes more noticeable as f_z increases.

- The surface plot shows a smooth, continuously rising response along the f_z direction, reinforcing the conclusion that feed rate is the key driver of MRR in this process.

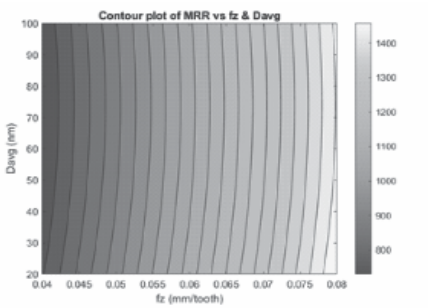


Figure 5. Contour plot for MRR

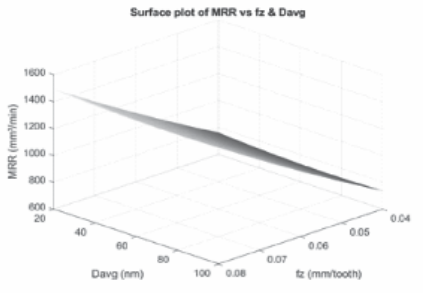


Figure 6. Surface plot for MRR

3.5. Summary of Findings

- The developed regression model for MRR shows excellent predictive capability with $R^2 = 0.9996$.

- Feed per tooth is the most influential factor, followed by depth of cut and cutting speed.

- Larger nanoparticle sizes tend to slightly reduce MRR, suggesting a trade-off between cooling/lubrication performance and material removal efficiency.

- The findings support the use of CuO-based Nano-MQL as a viable strategy for sustainable, high-efficiency hard milling.

4. CONCLUSION

This study focused on the modeling and optimization of MRR during the hard milling of 90CrSi tool steel using a CuO-based Nano-MQL lubrication system. A total of 45 experiments were conducted based on a Box–Behnken Design, considering four key input parameters: cutting speed, feed per tooth, depth of cut, and nanoparticle size.

- A second-order regression model was successfully developed to predict MRR with very high accuracy ($R^2 = 0.9996$). The analysis of standardized regression coefficients, main effects plots, and surface/contour graphs led to the following conclusions:

- Feed per tooth (f_z) is the most dominant factor influencing MRR, followed closely by depth of cut (a_p) and cutting speed (v_c).

- Nanoparticle size (D_{avg}) showed a moderate inverse influence on MRR,

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

particularly at higher feed rates.

- The regression model closely matched experimental data, as evidenced by a tight clustering of predicted vs. observed values.
- The combined use of CuO nanoparticles and canola oil in the Nano-MQL setup enabled stable and sustainable machining with high removal efficiency.

Overall, the results demonstrate that CuO-based Nano-MQL lubrication is an effective approach to enhance MRR in the hard milling of 90CrSi steel, and the proposed model provides a reliable basis for parameter selection and process optimization in sustainable machining applications.

Acknowledgment:

This work was supported by Thai Nguyen University of Technology (TNUT).❖

References:

[1]. O. Gutnichenko, S. G. Pozuelo, L. Llanes, and V. Bushlya, "*Analysis and Monitoring the Initial Tool Damage and Coating Failure when Hard Milling Vanadis 4E with TiAlN Coated PcBN*". Procedia CIRP, vol. 133, pp. 322-327, 2025.

[2]. H. Hassanpour, A. Rasti, J. H. Khosrowshahi, and S. S. Farshi, "*Effect of ball nose flank wear on surface integrity in high-speed hard milling of AISI 4340 steel using MQ*L". Heliyon, vol. 10, no. 18, 2024.

[3]. A. Vovk, J. Sölter, and B. Karpuschewski, "*Numerical investigation of the influence of multiple loads on material modifications during hard milling*". Procedia CIRP, vol. 102, pp. 500-505, 2021.

[4]. Q. Zhang, S. Zhang, and J. Li, "*Three dimensional finite element simulation of cutting forces and cutting temperature in hard milling of AISI H13 steel*". Procedia Manufacturing, vol. 10, pp. 37-47, 2017.

[5]. Z. Liu et al., "*Energy consumption characteristics in finish hard milling*". Journal of Manufacturing Processes, vol. 35, pp. 500-507, 2018.

[6]. S. K. Khare, P. Gulati, and J. P. Singh, "*Enhancing MRR in face milling by varying cutting speed*". Materials Today: Proceedings, 2023.

[7]. B. Li, T. Zhang, and S. Zhang, "*Deep cryogenic treatment of carbide tool and its cutting performances in hard milling of AISI H13 steel*". Procedia CIRP, vol. 71, pp. 35-40, 2018.

[8]. B. Beake et al., "*Wear performance of different PVD coatings during hard wet end milling of H13 tool stee*l". Surface and Coatings Technology, vol. 279, pp. 118-125, 2015.

[9]. M. Jenarthanan and N. Neeli, "*Optimization of process parameters on machining force and MRR in milling of GFRP composites using grey relational analysis*". i-Manager's Journal on Material Science, vol. 1, no. 3, p. 29, 2013.

[10]. J. MP, P. K. R. Gavireddy, C. S. Gummadi, and S. R. Mandapaka, "*Optimization of process parameters on machining force and MRR during end milling of GFRP composites using GR*A". World Journal of Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 407-413, 2018.

[11]. H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, and S. Shajari, "*Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication*". Journal of Cleaner Production, vol. 120, pp. 124-134, 2016.

[12]. R. Bian, E. Ferraris, N. He, and D. Reynaerts, "*Process investigation on meso-scale hard milling of ZrO_2 by diamond coated tools*". Precision Engineering, vol. 38, no. 1, pp. 82-91, 2014.

[13]. Q. An, C. Wang, J. Xu, P. Liu, and M. Chen, "*Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool*". International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 43, pp. 94-101, 2014.

[14]. Z. Liu, Y. Guo, M. Sealy, and Z. Liu, "*Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression*". Journal of Materials Processing Technology, vol. 229, pp. 305-312, 2016.

[15]. T. Teppernegg et al., "*Evolution of residual stress and damage in coated hard metal milling inserts over the complete tool life*". International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 47, pp. 80-85, 2014.

[16]. T. Teppernegg, P. Angerer, T. Klünsner, C. Tritremmel, and C. Czettl, "*Evolution of residual stress in Ti-Al-Ta-N coatings on hard metal milling inserts*". International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 52, pp. 171-175, 2015.

[17]. K. Jayakumar and P. A. Rahman, "*Effect of end milling parameters on MRR and hardness variation of AA7075*". Materials Today: Proceedings, vol. 72, pp. 2212-2216, 2023.

[18] A. Tamilarasan, D. Rajamani, and A. Renugambal, "*An approach on fuzzy and regression modeling for hard milling process*". Applied Mechanics and Materials, vol. 813, pp. 498-504, 2015.

QUY TRÌNH TẠO MẪU VÀ THỬ NGHIỆM ĐỘ BỀN CHO MẪU HÀN LIÊN KẾT DẠNG ĐÂU MÍ

EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLEXURAL STRENGTH OF WELDED JOINTS IN STEEL PLATE BUTT WELDS

Phạm Sĩ Hưng, Nguyễn Lê Tường, Huỳnh Quang Duy, Vũ Quang Huy*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22143113@student.hcmute.edu.vn;
tuongnl@hcmute.edu.vn;
duyhq@hcmute.edu.vn;
**huyvq@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quy trình chi tiết để chế tạo và đánh giá độ bền của các mẫu hàn liên kết dạng đầu mí. Nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa các thông số hàn, bao gồm dòng điện, áp suất điện cực và thời gian hàn, nhằm đảm bảo chất lượng mối hàn. Các mẫu được chế tạo theo tiêu chuẩn công nghiệp và thử nghiệm độ bền thông qua các phương pháp như kiểm tra kéo, uốn và phân tích vi cấu trúc. Kết quả cho thấy mối hàn đầu mí đạt độ bền cao khi các thông số được điều chỉnh chính xác, với ít khuyết tật. Nghiên cứu cũng đề xuất các cải tiến trong quy trình hàn để nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của liên kết. Những phát hiện này cung cấp giá trị thực tiễn cho ngành công nghiệp sản xuất, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu độ bền cơ học cao.

Từ khóa: *Hàn đầu mí; Độ bền mối hàn; Quy trình chế tạo; Thử nghiệm cơ học; Tối ưu hóa thông số.*

ABSTRACT

An experimental study was conducted to assess the flexural strength of butt-welded steel plate joints under bending conditions. Steel plate specimens were welded using TIG and MIG techniques, with welding parameters optimized for high-quality welds. Three-point bending tests were performed to measure maximum bending force, deformation, and failure mechanisms. The results revealed that TIG welds demonstrated superior flexural strength compared to MIG welds, due to a smaller heat-affected zone and fewer weld imperfections. Key factors influencing flexural strength included plate thickness, weld edge preparation angle, and welding energy. This study provides valuable experimental insights for the design and optimization of welded steel plate joints in structural applications.

Keywords: *Seam welding; Weld strength; Manufacturing process; Mechanical testing; Parameter optimization.*

1. TỔNG QUAN

Hàn MIG (Metal Inert Gas), hay còn gọi là hàn dây dưới khí bảo vệ, đã trở thành một phương pháp hàn phổ biến và hiệu quả trong lĩnh vực công nghiệp hiện đại. Nguyên lý của phương pháp này dựa trên việc tạo ra hồ quang điện giữa dây điện cực nóng chảy và bề mặt kim loại cần hàn, sử dụng nguồn điện một chiều (DC) không đổi để duy trì hồ quang ổn định và liên tục. Dưới tác động của hồ quang điện, dây điện cực nóng chảy tạo thành các giọt kim loại, điền đầy khe hở giữa hai mép kim loại, từ đó hình thành mối hàn bền chắc [1]. Lớp khí bảo vệ như argon, hỗn hợp argon–helium, hoặc CO_2 đóng vai trò then chốt trong việc che chắn mối hàn khỏi oxy và tạp chất trong không khí, đồng thời ổn định hồ quang và cải thiện hình dạng mối hàn [2].

Hệ thống hàn MIG bao gồm các bộ phận chính như nguồn điện DC, súng hàn, bộ cấp dây tự động, kẹp nối đất, hệ thống khí bảo vệ và thiết bị điều khiển [3]. Nguồn điện DC cung cấp dòng điện và điện áp ổn định, hỗ trợ duy trì tốc độ hàn cao hơn so với các phương pháp truyền thống như hàn que [4]. Bộ cấp dây tự động giúp duy trì nguồn cung cấp dây hàn liên tục, giảm thiểu sự gián đoạn trong quá trình hàn, đồng thời nâng cao chất lượng và hiệu quả sản xuất. Đặc điểm này cũng làm cho hàn MIG trở thành lựa chọn lý tưởng để tích hợp vào dây chuyền tự động hóa và hệ thống robot hàn [5].

So với phương pháp hàn que, hàn MIG cho phép thực hiện các mối hàn có chất lượng cao, đồng đều và ít khuyết tật hơn. Mối hàn được tạo ra thường có bề mặt bóng đẹp, giảm thiểu hiện tượng bắn tóe và khả năng tạo xỉ. Ngoài ra, hàn MIG có khả năng hàn được nhiều loại vật liệu như thép không gỉ, nhôm, magiê, đồng, niken và các hợp kim đặc biệt, mở rộng phạm vi ứng dụng của nó trong nhiều ngành công nghiệp [6]. Nhờ vào tốc độ hàn nhanh, hiệu quả sản xuất cao và chi phí đầu tư ban đầu hợp lý, hàn MIG đã trở thành một giải pháp tối ưu cho cả sản xuất hàng loạt và các ứng dụng đòi hỏi sự linh hoạt cao [7].

Trong thực tiễn, hàn MIG được sử dụng phổ biến trong các ngành chế tạo khung xe máy, bàn ghế inox, các kết cấu thép chịu lực lớn và các bộ phận cơ khí có yêu cầu cao về chất lượng mối hàn [8]. Đặc biệt, khả năng tự động hóa và tích hợp với robot đã giúp hàn MIG trở thành công nghệ không thể thiếu trong các dây chuyền sản xuất hiện đại, từ các nhà máy chế tạo ô tô đến các công trình xây dựng quy mô lớn [9]. Các yếu tố như tốc độ cấp dây, loại khí bảo vệ, và thông số điện hàn đều có vai trò quyết định đến chất lượng mối hàn, do đó việc kiểm soát và tối ưu các thông số này là yếu tố tiên quyết để nâng cao độ bền của liên kết hàn [10].

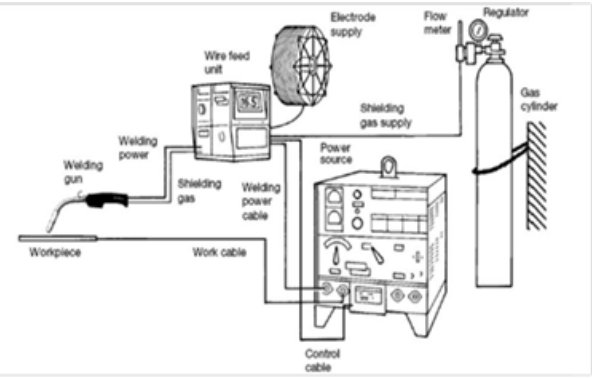
Để đánh giá và tối ưu hóa quá trình hàn MIG, quy trình tạo mẫu và thử nghiệm độ bền cho mối hàn đầu mí (butt joint) được xây dựng chặt chẽ. Đầu tiên, các thông số kỹ thuật như dòng điện, điện áp, tốc độ cấp dây và loại khí bảo vệ được xác định dựa trên đặc tính vật liệu và yêu cầu kết cấu [11]. Sau đó, mẫu hàn được thực hiện theo quy trình bán tự động hoặc tự động, đảm bảo sự ổn định và nhất quán của các mối hàn. Trong quá trình thực nghiệm, các mẫu hàn sẽ được kiểm tra trực quan để phát hiện các khuyết tật bề mặt như nứt, rỗ hoặc bắn tóe, đồng thời tiến hành cắt ngang mẫu hàn để đánh giá độ ngấu và tính đồng đều của lớp kim loại nóng chảy.

Bên cạnh việc kiểm tra trực quan và cắt ngang, các phương pháp thử nghiệm cơ học như kéo, uốn và nén cũng được áp dụng để xác định độ bền và khả năng chịu lực của mối hàn. Việc phân tích cấu trúc vi mô của mối hàn và ☞

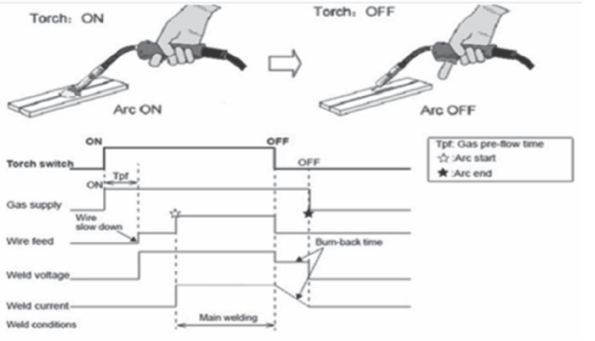
vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) bằng kính hiển vi điện tử cung cấp thông tin quan trọng về tính chất cơ học và sự phân bố pha trong mối hàn [12]. Từ những dữ liệu thực nghiệm này, các mối quan hệ giữa thông số công nghệ và chất lượng mối hàn sẽ được thiết lập, làm cơ sở cho việc tối ưu hóa quá trình hàn MIG trong các ứng dụng thực tiễn.

Kết quả ban đầu cho thấy, khi các thông số hàn được tối ưu hợp lý, mối hàn MIG có độ ngấu cao, ít khuyết tật và khả năng chịu lực tốt. Các nghiên cứu cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc sử dụng khí bảo vệ có độ tinh khiết cao và hệ thống cấp dây ổn định để đạt được chất lượng mối hàn tối ưu. Hướng phát triển trong tương lai của hàn MIG tập trung vào việc ứng dụng các cảm biến thông minh, hệ thống điều khiển tự động và dây hàn hợp kim đặc biệt nhằm nâng cao hiệu suất, giảm thiểu tiêu hao năng lượng và mở rộng phạm vi ứng dụng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi cao về chất lượng và độ bền [5], [11].

Tóm lại, hàn MIG là một giải pháp vượt trội về hiệu quả sản xuất, chất lượng mối hàn và khả năng tự động hóa. Quy trình tạo mẫu và thử nghiệm độ bền mối hàn đầu mí không chỉ giúp xác định tính chất cơ học và vi cấu trúc của mối hàn mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa công nghệ, đảm bảo chất lượng sản phẩm và an toàn trong sản xuất. Với xu hướng tự động hóa và tích hợp robot ngày càng phát triển, hàn MIG sẽ tiếp tục đóng vai trò then chốt trong công nghiệp hiện đại, từ các công trình xây dựng quy mô lớn đến ngành chế tạo cơ khí và chế tạo ô tô.



Hình 1. Hệ thống hàn MIG



Hình 2. Hàn đầu mí bằng máy MIG

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Tổng quan về khuyết tật mối hàn: Khuyết tật mối hàn, thường được gọi là các bất liên tục trong mối hàn, là những sai lệch so với cấu trúc mối hàn lý tưởng, có thể làm giảm tính toàn vẹn và hiệu suất của các mối nối hàn. Những khuyết tật này có thể phát sinh do kỹ thuật hàn không đúng, vật liệu không phù hợp hoặc các yếu tố môi trường. Các loại khuyết tật phổ biến bao gồm lỗ rỗ, lẫn tạp chất, nứt, thiếu ngấu và ngấu không hoàn toàn. Mỗi loại có đặc điểm riêng và ảnh hưởng đến các tính chất cơ học của mối hàn, như giảm độ bền, độ dẻo hoặc khả năng chống mỏi. Ví dụ, lỗ rỗ có thể làm suy yếu mối hàn bằng cách tạo ra các khoảng trống, trong khi các vết nứt có thể lan rộng dưới tác dụng của ứng suất, dẫn đến hỏng hóc nghiêm trọng. Việc hiểu rõ các khuyết tật

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

này là rất quan trọng để đảm bảo chất lượng mối hàn và độ tin cậy của kết cấu trong các ứng dụng từ xây dựng đến hàng không vũ trụ.

Nguyên nhân và biện pháp khắc phục: Khuyết tật thường xuất hiện do các thông số hàn không chính xác (ví dụ, dòng điện quá cao hoặc quá thấp), chuẩn bị mối nối kém hoặc bảo vệ khí không đầy đủ. Để giảm thiểu các vấn đề này, thợ hàn cần tối ưu hóa thông số, đảm bảo vệ sinh mối nối đúng cách và sử dụng khí bảo vệ phù hợp. Việc kiểm tra định kỳ và tuân thủ các tiêu chuẩn hàn cũng đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu khuyết tật.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

• Cắt phay mẫu hàn: Đầu tiên, mẫu hàn được gia công bằng phương pháp phay để tạo mặt phẳng phục vụ đo đạc. Mẫu cần được gá chắc chắn, đảm bảo mặt phẳng sau phay phẳng và thẳng, tạo điều kiện thuận lợi cho các bước tiếp theo.

• Mài bề mặt: Tiến hành mài mặt phẳng cần kiểm tra bằng giấy nhám theo thứ tự độ nhám giảm dần: P180, P240, P320, P400, P600. Quá trình mài thực hiện trên bề mặt phẳng (tốt nhất là kính), thao tác đều tay để tránh tạo vết xước lớn.

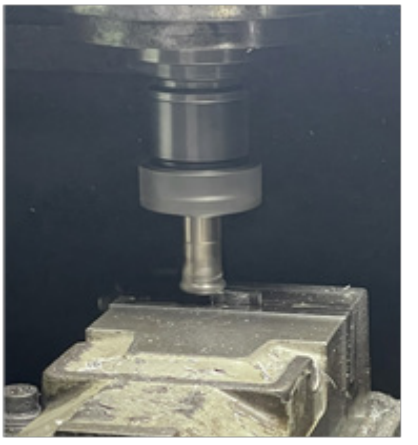
• Đánh bóng mẫu: Sử dụng máy đánh bóng để làm mịn bề mặt mẫu trong 5-10 phút, đảm bảo bề mặt đạt độ bóng cao, hỗ trợ tốt cho bước tẩm thực.

• Tẩm thực axit: Nhúng tăm bông vào một lượng nhỏ axit, bôi đều lên bề mặt mẫu trong 15-20 giây, sau đó rửa sạch bằng nước và lau khô. Quá trình này giúp làm nổi bật cấu trúc mối hàn, dễ dàng quan sát và đo đạc.

• Đo đạc mối hàn: Sử dụng kính hiển vi có phân độ 0,1 mm và phần mềm ImageJ để xác định chiều cao, chiều rộng và độ ngấu của mối hàn một cách chính xác.



Hình 3. Mẫu sau hàn



Hình 4. Gia công mẫu sau hàn

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm được thực hiện trên các tấm thép có độ dày 5 mm nhằm tìm hiểu ảnh hưởng của các thông số hàn đến hình dạng và chất lượng của mối hàn. Mục tiêu chính là thu thập và phân tích dữ liệu về độ rộng, độ ngấu và chiều cao mối hàn để từ đó đưa ra các nhận xét quan trọng, giúp tối ưu hóa quy trình hàn. ☞

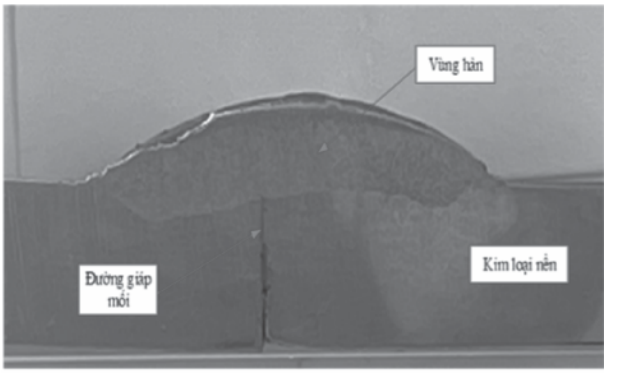
Để thực hiện việc đo đạc một cách chính xác, nhóm nghiên cứu đã sử dụng phần mềm ImageJ, kết hợp với thước trắc vi. Phần mềm ImageJ hỗ trợ xử lý hình ảnh kỹ thuật số và phân tích hình thái học, cho phép đo lường kích thước các chi tiết nhỏ trên hình ảnh một cách thuận tiện và có độ chính xác cao. Trong khi đó, thước trắc vi hỗ trợ đo trực tiếp trên mẫu hoặc trên hình ảnh, cung cấp độ tin cậy bổ sung.

Tổng cộng 30 mẫu hàn đã được tiến hành phân tích kỹ lưỡng. Mỗi mẫu hàn sau khi hoàn thành được chụp ảnh bề mặt và lưu trữ kèm theo số liệu đo đạc cụ thể. Việc thu thập đầy đủ hình ảnh và bảng dữ liệu giúp đảm bảo tính khách quan cũng như độ tin cậy cao cho toàn bộ quá trình nghiên cứu.

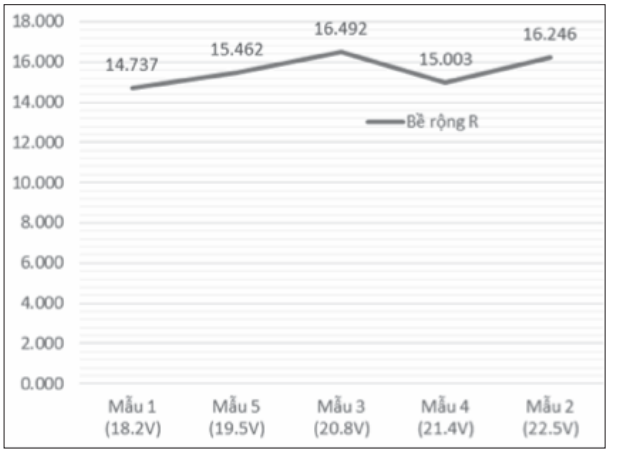
Kết quả phân tích các mẫu cho thấy sự biến thiên đáng kể về hình dạng mối hàn giữa các mẫu. Cụ thể, mẫu số 1 có độ rộng mối hàn đạt 14,737 mm, độ ngấu 0,741 mm và chiều cao 1,992 mm. Trong khi đó, mẫu số 30 lại có độ rộng mối hàn lớn nhất, lên đến 28,459 mm, nhưng độ ngấu chỉ đạt 0,702 mm và chiều cao là 1,776 mm. Điều này phản ánh rằng các yếu tố ảnh hưởng đến hình dạng mối hàn không chỉ phụ thuộc vào một thông số duy nhất mà còn do sự kết hợp của nhiều thông số kỹ thuật khác.

Đáng chú ý là mẫu số 28 có độ ngấu khá cao (2,3 mm) và chiều cao mối hàn lớn nhất (4,433 mm), nhưng độ rộng mối hàn lại chỉ là 7,54 mm. Ngược lại, mẫu số 29 ghi nhận độ rộng mối hàn tương đối lớn (26,066 mm) nhưng chiều cao chỉ đạt 1,719 mm. Những khác biệt này phản ánh ảnh hưởng phức tạp của các thông số hàn (như cường độ dòng điện, tốc độ hàn, loại que hàn, góc độ hàn…) đến hình thái mối hàn.

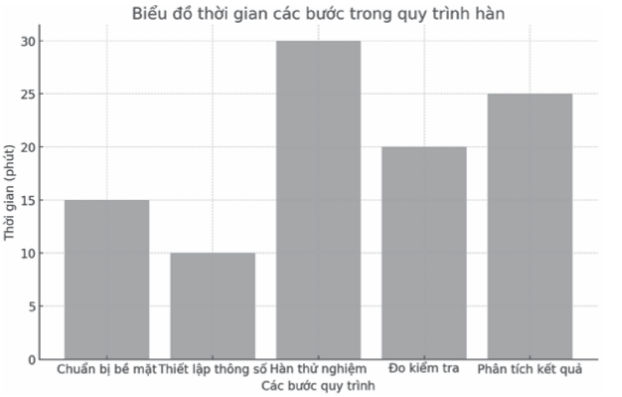
.



Hình 5. Kết quả kiểm tra hình dáng đường hàn



Hình 6. Thể hiện sự thay đổi bề rộng của nhóm A



Hình 7. Phân bố thời gian giữa các bước

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về quy trình chế tạo và thử nghiệm độ bền mẫu hàn liên kết dạng đầu mí trên thép tấm dày 5 mm đã mang lại những

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

kết quả đáng chú ý. Thông qua việc đo đạc các thông số mối hàn như độ rộng, độ ngấu và chiều cao bằng phần mềm ImageJ và thước trắc vi, thí nghiệm trên 30 mẫu hàn cho thấy sự biến thiên rõ rệt trong hình dạng và chất lượng mối hàn. Các mẫu như mẫu số 28 và 30 đạt các giá trị đặc biệt về độ ngấu và độ rộng, phản ánh ảnh hưởng mạnh mẽ của thông số hàn đến hiệu suất mối hàn. Những phát hiện này không chỉ làm sáng tỏ mối quan hệ giữa các thông số kỹ thuật và chất lượng mối hàn mà còn cung cấp dữ liệu thực tiễn để tối ưu hóa quy trình hàn trong công nghiệp. Nghiên cứu đề xuất điều chỉnh chính xác dòng điện, áp suất điện cực và thời gian hàn để giảm thiểu khuyết tật và nâng cao độ bền. Hướng nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào việc thử nghiệm các vật liệu khác hoặc tích hợp tự động hóa để cải thiện hiệu quả và độ đồng nhất của mối hàn.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Huỳnh Đỗ Song Toàn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Phạm Sĩ Hưng, Nguyễn Lê Tường, Huỳnh Quang Duy, Vũ Quang Huy.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-361.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Benakis, M., Costanzo, D., & Patran, A. (2020), "*Current mode effects on weld bead geometry and heat affected zone in pulsed wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V and Inconel 718*". Journal of Manufacturing Processes, 60, 61–74. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.038

[2]. Kiran, D. V., Cho, D. W., Song, W. H., & Na, S. J. (2014), *"Arc behavior in two wire tandem submerged arc welding*". Journal of Materials Processing Technology, 214(8), 1546–1556. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.027

[3]. Ding, X. P., Li, H., Wei, H. L., & Liu, J. Q. (2016), "*Numerical analysis of arc plasma behavior in double-wire GMAW*". Vacuum, 124, 46–54. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.11.014

[4]. Wang, X. L., Zhang, Q., Yang, Y. S., Luo, C. F., & Hu, Q. X. (2025), "*Impact of welding current on arc physical characteristics in single-power, double-wire, single-arc gas metal arc welding*". Welding in the World. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s40194-024-01675-9

[5]. Zhan, J. T., Ye, X. Y., Liu, Z. Z., Zhong, S. T., Zhou, Y. C., Zhang, R., Liang, Z. X., & Shi, Y. H. (2025), "*Numerical investigation of dynamic arc behavior in K-TIG welding enhanced by an external sinusoidal alternating longitudinal magnetic field*". International Journal of Thermal Sciences, 212, Article 109744. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109744

[6]. Wu, K. Y., Zhan, J. T., Cao, X. W., Zeng, M., & Ding, N. (2020), "*Metal transfer of aluminum alloy double-wire pulsed GMAW with a median waveform*". Journal of Materials Processing Technology, 286, Article 116761. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116761

[7]. Wu, K. Y., Xie, P. M., Liu, Z., Zeng, M., & Liang, Z. Y. (2020), "*Investigation of double arc interaction mechanism and quantitative analysis of double arc offset in high-power double-wire DP-GMAW*". Journal of Manufacturing Processes, 49, 423–437. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.006

[8]. Scalet Rossini, L. F., Valenzuela Reyes, R. A., & Spinelli, J. E. (2019), "*Double-wire tandem GMAW welding process of HSLA50 steel*". Journal of Manufacturing Processes, 45, 227–233. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.006

[9]. Wu, K. Y., Chen, Q. R., Liu, Z. T., Wu, Y. M., & Zeng, Y. C. (2025), "*Arc characteristic in aluminum alloy double-wire variable polarity double base pulsed gas metal arc welding*". Vacuum, 233, Article 113914. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113914

[10]. Bellamkonda, P. N., Dwivedy, M., & Addanki, R. (2024), "*Cold metal transfer technology - A review of recent research developments*". Results in Engineering, 23, Article 102423. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102423

[11]. Liu, C., Li, Q., & Yang, X. D. (2023), "*Analysis of arc plasma characteristics and energy distribution in EDM based on two-temperature model*". Precision Engineering, 83, 204–315. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.06.006

[12]. Zhao, Y. Y., & Chung, H. (2017), "*Numerical simulation of droplet transfer behavior in variable polarity gas metal arc welding*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 111, 1129–1141. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.071

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP IN 3D TỪ VẬT LIỆU LỎNG TRONG CHẾ TẠO CHI TIẾT CÓ KẾT CẤU DẠNG LATTICE

RESEARCH ON THE APPLICATION OF 3D PRINTING USING LIQUID MATERIALS IN THE MANUFACTURING OF LATTICE-STRUCTURED COMPONENTS

Nguyễn Dương Quang Huy, Tạ Nguyễn Minh Đức, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 22144100@student.hcmute.edu.vn; ductnm@hcmute.edu.vn; duyhq@hcmute.edu.vn; *sonnv@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Công nghệ in 3D bằng vật liệu lỏng (như SLA, DLP) ngày càng được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao và hình dạng phức tạp. Trong đó, kết cấu dạng lattice (mạng lưới rỗng với cấu trúc lặp) được sử dụng phổ biến trong các lĩnh vực như y sinh, hàng không, ô tô... nhờ đặc tính nhẹ, chịu tải tốt và khả năng hấp thụ năng lượng. Nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng để chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice. Phương pháp này bao gồm các công nghệ tiên tiến như SLA và DLP, sử dụng vật liệu nhựa quang hóa để tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao. Kết cấu lattice được thiết kế để giảm trọng lượng, đảm bảo khả năng chịu tải và hấp thụ năng lượng hiệu quả. Kết quả nghiên cứu và thảo luận cho thấy tiềm năng to lớn của công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng trong việc sản xuất các chi tiết kỹ thuật với độ chính xác và hiệu suất cao. Công nghệ này có thể tạo ra các sản phẩm có hình dạng phức tạp và đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đặc thù.

Từ khóa: *Công nghệ in 3D; SLA; DLP; Kết cấu dạng lattice.*

ABSTRACT

3D printing technology using liquid materials (such as SLA and DLP) is increasingly popular due to its ability to produce highly precise and complex-shaped components. Lattice structures (hollow networks with repeating patterns) are widely used in fields like biomedicine, aerospace, and automotive, thanks to their lightweight nature, load-bearing capacity, and energy absorption. This research focuses on applying liquid material 3D printing to fabricate components with lattice structures. This method includes advanced technologies like SLA and DLP, using photopolymer resins to create highly accurate parts. Lattice structures are designed to reduce weight while ensuring load-bearing capacity and efficient energy absorption. Research results and discussion highlight the significant potential of liquid material 3D printing in producing high-precision and high-performance technical components. This technology can create complex-shaped products and meet specific technical requirements.

Keywords: *3D printing technology; SLA; DLP; Lattice structure.*

1. TỔNG QUAN

Công nghệ in 3D, hay còn gọi là sản xuất đắp dần (additive manufacturing - AM), đã trở thành một bước đột phá trong lĩnh vực chế tạo, cho phép tạo ra các chi tiết phức tạp với độ chính xác cao mà không cần các phương pháp gia công truyền thống như cắt gọt hay đúc [1]. Trong số các kỹ thuật in 3D, phương pháp sử dụng vật liệu lỏng, chẳng hạn như nhựa quang hóa (photopolymer resin) hoặc vật liệu polymer lỏng, đã thu hút sự chú ý nhờ khả năng tạo ra các chi tiết có độ phân giải cao và cấu trúc phức tạp, đặc biệt là các kết cấu dạng lattice [2]. Kết cấu lattice, với đặc trưng là các mạng lưới lặp lại của các đơn vị ô (unit cells), mang lại các ưu điểm vượt trội như trọng lượng nhẹ, độ bền cao và khả năng hấp thụ năng lượng tốt, khiến chúng trở thành lựa chọn lý tưởng trong nhiều ứng dụng từ hàng không vũ trụ, y sinh đến cơ khí chế tạo [3]. Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng để chế tạo các chi tiết có kết cấu dạng lattice, phân tích tiềm năng, thách thức và các hướng phát triển trong tương lai.

Công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng chủ yếu dựa trên các phương pháp như lập thể in quang (Stereolithography - SLA), xử lý ánh sáng kỹ thuật số (Digital Light Processing - DLP) và in phun liên tục (Continuous Liquid Interface Production - CLIP) [4]. Các phương pháp này sử dụng ánh sáng (thường là tia UV hoặc laser) để làm cứng từng lớp vật liệu lỏng, thường là nhựa quang hóa, theo mô hình được thiết kế trước. Điểm nổi bật của các phương pháp này là khả năng đạt độ phân giải cao, thậm chí ở mức micromet, phù hợp để chế tạo các chi tiết có cấu trúc phức tạp như lattice [5].

So với các kỹ thuật in 3D khác như ép đùn vật liệu (Fused Deposition Modeling - FDM) hay thiêu kết laser chọn lọc (Selective Laser Sintering - SLS), in 3D từ vật liệu lỏng có ưu điểm về độ mịn bề mặt và khả năng tái hiện chi tiết. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này bao gồm chi phí vật liệu cao, thời gian xử lý sau in (post-processing) phức tạp và sự phụ thuộc vào tính chất cơ học của vật liệu lỏng [6]. Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc cải tiến vật liệu lỏng, chẳng hạn như phát triển nhựa composite hoặc nhựa sinh học, nhằm nâng cao độ bền và khả năng ứng dụng trong các môi trường khắc nghiệt [7].

(*) Kết cấu lattice và vai trò trong chế tạo hiện đại

Kết cấu lattice là các cấu trúc không gian ba chiều được tạo thành từ các đơn vị ô lặp lại, chẳng hạn như hình lập phương, lục giác hoặc cấu trúc giàn (truss) [8]. Nhờ vào thiết kế tối ưu hóa, các kết cấu này có thể đạt được tỷ lệ độ bền trên trọng lượng cao, đồng thời cho phép kiểm soát các tính chất cơ học như độ cứng, độ dẻo hoặc khả năng hấp thụ năng lượng [9]. Trong lĩnh vực hàng không vũ trụ, các chi tiết lattice được sử dụng để giảm trọng lượng của các bộ phận như cánh máy bay hoặc khung vệ tinh mà vẫn đảm bảo độ bền cơ học [10]. Trong y sinh, cấu trúc lattice được ứng dụng trong sản xuất các khung xương nhân tạo (scaffolds) nhờ khả năng tương thích sinh học và cấu trúc xốp phù hợp với sự phát triển của tế bào [11].

Việc chế tạo kết cấu lattice bằng các phương pháp truyền thống như đúc hoặc gia công CNC thường gặp khó khăn do độ phức tạp hình học và chi phí sản xuất cao. Công nghệ in 3D, đặc biệt là từ vật liệu lỏng, đã mở ra cơ hội để chế tạo các cấu trúc này với độ chính xác cao và thời gian sản xuất ngắn hơn [12]. Tuy nhiên, việc thiết kế và tối ưu hóa kết cấu lattice đòi ☞

hỏi sự kết hợp giữa mô phỏng số (finite element analysis - FEA) và các thuật toán tối ưu hóa topo (topology optimization) để đảm bảo hiệu suất tối ưu [13].

(*) Ứng dụng của in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo kết cấu lattice

Phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nhờ khả năng tạo ra các chi tiết lattice có độ phức tạp cao. Trong ngành hàng không vũ trụ, các nhà nghiên cứu đã sử dụng kỹ thuật SLA để chế tạo các cấu trúc lattice làm từ nhựa composite, giúp giảm 30-40% trọng lượng của các chi tiết so với vật liệu rắn truyền thống [10]. Trong y sinh, các khung xương nhân tạo được in bằng kỹ thuật DLP từ nhựa sinh học đã cho thấy khả năng hỗ trợ tái tạo mô và tích hợp tốt với cơ thể người [11].

Ngoài ra, trong lĩnh vực cơ khí, các cấu trúc lattice được chế tạo từ vật liệu lỏng có thể được sử dụng làm bộ phận hấp thụ năng lượng trong các hệ thống giảm chấn hoặc vỏ bảo vệ. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng các cấu trúc lattice với thiết kế phân cấp (hierarchical lattice) có thể tăng khả năng hấp thụ năng lượng lên đến 50% so với các cấu trúc đồng nhất [14]. Tuy nhiên, để đạt được hiệu quả tối ưu, cần phải giải quyết các thách thức liên quan đến tính chất cơ học của vật liệu lỏng, chẳng hạn như độ giòn hoặc khả năng chịu nhiệt độ cao.

Mặc dù có nhiều tiềm năng, việc ứng dụng in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo kết cấu lattice vẫn đối mặt với một số thách thức. Thứ nhất, tính chất cơ học của vật liệu lỏng, đặc biệt là nhựa quang hóa, thường bị hạn chế bởi độ bền kéo và khả năng chịu tải thấp so với kim loại hoặc polymer rắn [6]. Các nghiên cứu đang tập trung vào việc phát triển vật liệu composite lỏng, kết hợp các hạt nano hoặc sợi để cải thiện tính chất cơ học, nhưng chi phí sản xuất vẫn là một rào cản lớn [7].

Thứ hai, quy trình in 3D từ vật liệu lỏng đòi hỏi các bước xử lý sau in phức tạp, bao gồm rửa, làm cứng bằng UV và loại bỏ vật liệu hỗ trợ (support structures). Những bước này không chỉ làm tăng thời gian sản xuất mà còn có thể ảnh hưởng đến độ chính xác của chi tiết, đặc biệt với các cấu trúc lattice có kích thước nhỏ [5]. Thứ ba, việc tối ưu hóa thiết kế lattice để đạt được hiệu suất tối đa đòi hỏi sự kết hợp giữa phần mềm thiết kế, mô phỏng và thử nghiệm thực tế, dẫn đến chi phí tính toán và thời gian phát triển cao [13].

Để vượt qua các thách thức trên, các hướng nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào ba khía cạnh chính: phát triển vật liệu mới, cải tiến công nghệ in và tối ưu hóa thiết kế. Về vật liệu, các loại nhựa lỏng có tính chất cơ học cải tiến, chẳng hạn như nhựa sinh học hoặc nhựa chịu nhiệt, sẽ mở rộng phạm vi ứng dụng của kết cấu lattice [7]. Về công nghệ, các phương pháp in 3D tốc độ cao như CLIP có thể giảm thời gian sản xuất và cải thiện hiệu suất của quy trình [4]. Về thiết kế, việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy (machine learning) trong tối ưu hóa topo và thiết kế lattice có thể giúp tạo ra các cấu trúc hiệu quả hơn với chi phí thấp hơn [9].

Ngoài ra, việc tích hợp in 3D từ vật liệu lỏng với các công nghệ khác, chẳng hạn như in 4D (sử dụng vật liệu có khả năng thay đổi hình dạng theo thời gian), có thể mở ra các ứng dụng mới trong các lĩnh vực như robot mềm hoặc thiết bị y tế thông minh [12]. Các nghiên cứu liên ngành giữa kỹ thuật vật liệu, cơ khí và công nghệ thông tin sẽ đóng vai trò quan trọng

trong việc thúc đẩy sự phát triển của công nghệ này.

Công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng đã chứng minh tiềm năng to lớn trong việc chế tạo các chi tiết có kết cấu dạng lattice, mang lại lợi ích về trọng lượng, độ bền và tính linh hoạt trong thiết kế. Tuy nhiên, để ứng dụng rộng rãi trong thực tiễn, cần phải giải quyết các thách thức liên quan đến vật liệu, quy trình sản xuất và tối ưu hóa thiết kế. Với sự tiến bộ của khoa học vật liệu và công nghệ in 3D, kết cấu lattice được chế tạo từ vật liệu lỏng hứa hẹn sẽ đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp hiện đại, từ hàng không vũ trụ đến y sinh và cơ khí chế tạo.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Cơ sở lý thuyết của nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice bao gồm các khía cạnh chính như sau. Công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng, bao gồm SLA (Stereolithography) và DLP (Digital Light Processing), sử dụng vật liệu nhựa quang hóa có khả năng đông cứng dưới tác động của ánh sáng, cho phép tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao và hình dạng phức tạp. Kết cấu lattice, với mạng lưới rỗng và cấu trúc lặp, được thiết kế để giảm trọng lượng mà vẫn đảm bảo khả năng chịu tải tốt, đồng thời có khả năng hấp thụ năng lượng hiệu quả trong các ứng dụng yêu cầu độ bền cao và tiết kiệm vật liệu. Các phân tích cơ học thông qua mô hình toán học và phương pháp phần tử hữu hạn (FEA) giúp dự đoán hành vi của kết cấu lattice dưới tác động của lực, từ đó phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu tải để tối ưu hóa thiết kế. Trong thực tiễn, công nghệ này được ứng dụng rộng rãi trong y sinh để sản xuất các thiết bị cấy ghép và mô hình giải phẫu, trong hàng không để chế tạo các bộ phận máy bay nhẹ mà bền và trong ngành ô tô để sản xuất các chi tiết nhẹ, chịu lực tốt, giúp cải thiện hiệu suất vận hành. Các lợi ích chính của công nghệ bao gồm việc tiết kiệm vật liệu, giảm chi phí sản xuất, tăng tính linh hoạt trong thiết kế và sản xuất, đồng thời đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật phức tạp trong nhiều ngành công nghiệp. Đây là cơ sở quan trọng để ứng dụng và phát triển công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice.

3. MÔ PHỎNG

Quy trình mô phỏng cơ bản thường bao gồm các bước như sau: Xây dựng mô hình 3D của chi tiết với kết cấu lattice bằng các phần mềm thiết kế như Solidworks, CATIA hoặc Fusion 360, đảm bảo phản ánh chính xác cấu trúc thực tế. Mô hình sau đó có thể được xuất sang định dạng phù hợp (như STL) để sử dụng trong các phần mềm mô phỏng miễn phí hoặc mã nguồn mở như FreeCAD hoặc Code_Aster. Trong giai đoạn tiếp theo, các đặc tính vật liệu, như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi, được xác định thông qua phân tích lý thuyết hoặc dữ liệu thực nghiệm. Điều kiện tải trọng như lực uốn, lực kéo hoặc áp suất được thiết lập dựa trên các ứng dụng thực tế. Sau đó, các phương pháp toán học hoặc thuật toán mô phỏng được sử dụng để phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu lực của kết cấu lattice. Kết quả mô phỏng sẽ cung cấp thông tin về hiệu suất của thiết kế, từ đó điều chỉnh thông số cấu trúc để tối ưu hóa. Ngoài ra, mô phỏng cũng có thể kết hợp dữ liệu thực nghiệm để tăng độ chính xác, sử dụng các công cụ như Excel hoặc Python để tính toán và hiển thị kết quả.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Mô phỏng nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết ☞

có kết cấu dạng lattice bằng phần mềm ANSYS là quy trình quan trọng giúp phân tích và tối ưu hóa thiết kế. Quá trình bắt đầu bằng việc xây dựng mô hình 3D chi tiết với kết cấu lattice, sử dụng ANSYS Design Modeler để tạo hình học phản ánh chính xác đặc điểm của chi tiết. Sau đó, lưới mô hình được chia nhỏ thông qua ANSYS Meshing nhằm đảm bảo phân tích chính xác các yếu tố cơ học. Vật liệu như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi được định nghĩa trong hệ thống, với hỗ trợ các loại vật liệu từ kim loại đến composite. Tải trọng thực tế, bao gồm lực uốn, lực kéo hoặc áp suất, được áp dụng cùng với các điều kiện biên để mô phỏng chính xác môi trường hoạt động. Các phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu uốn được thực hiện qua module ANSYS Mechanical để đánh giá hiệu suất và tối ưu hóa thiết kế bằng cách điều chỉnh độ dày thanh, hình dạng hoặc cấu trúc của kết cấu lattice. Cuối cùng, các thông số đầu ra như ứng suất tối đa, độ võng và hiệu suất tổng thể được đánh giá để kiểm tra tính khả thi và hiệu quả của thiết kế. Đây là quy trình mô phỏng đầy triển vọng, mang lại giá trị thực tiễn lớn trong việc ứng dụng công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng vào chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả và thảo luận về nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice cho thấy tiềm năng to lớn của công nghệ này trong việc sản xuất các chi tiết kỹ thuật với độ chính xác và hiệu suất cao. Công nghệ in 3D bằng vật liệu lỏng, bao gồm SLA và DLP, đã khẳng định khả năng tạo ra các sản phẩm có hình dạng phức tạp và đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật đặc thù. Kết cấu dạng lattice, với thiết kế mạng lưới rỗng và cấu trúc lặp, giúp tối ưu hóa trọng lượng mà vẫn đảm bảo khả năng chịu tải tốt. Trong phân tích cơ học, các thông số như ứng suất, độ võng và biến dạng của kết cấu đã được đánh giá kỹ lưỡng thông qua các phương pháp mô phỏng và thực nghiệm, chứng minh khả năng hấp thụ năng lượng và độ bền cơ học vượt trội. Ngoài ra, các ứng dụng thực tiễn trong lĩnh vực y sinh, hàng không và ô tô đã cho thấy lattice đóng vai trò quan trọng trong việc sản xuất các chi tiết nhẹ, bền và phù hợp với yêu cầu sử dụng cụ thể. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng chỉ ra một số thách thức cần cải thiện như giảm chi phí vật liệu hoặc rút ngắn thời gian sản xuất để tăng tính cạnh tranh. Thảo luận về các kết quả đạt được mở ra triển vọng mới cho việc phát triển và ứng dụng công nghệ này, đồng thời tạo động lực để tiếp tục nghiên cứu sâu hơn nhằm tối ưu hóa các thiết kế và quy trình sản xuất.

5.1. Setup thí nghiệm

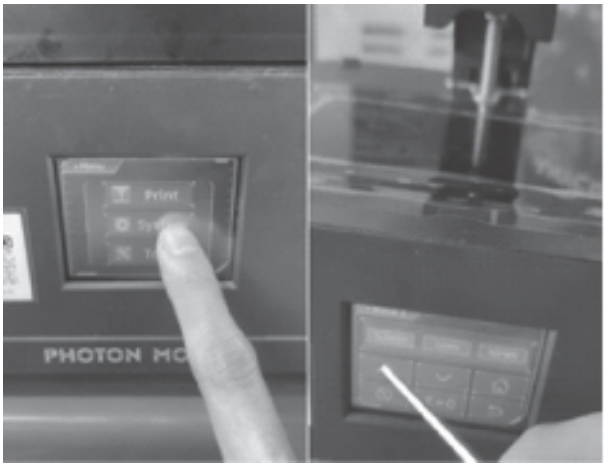


Hình 1. Chuẩn bị thiết bị

Khi bắt đầu quy trình in 3D bằng máy Anycubic Photon Mono, trước tiên người dùng cần khởi động máy bằng cách nhấn nút nguồn. Sau khi màn hình cảm ứng hiển thị giao diện chính, người dùng chọn mục "Tool" để vào phần điều chỉnh và hiệu chuẩn. Tiếp theo, trong mục "Move Z", người dùng sử dụng các nút điều khiển để di chuyển trục Z theo các bước 0.1mm, 1mm hoặc 10mm nhằm đưa bàn in về vị trí ban đầu hoặc điều chỉnh khoảng cách chính xác giữa bàn in và màn hình. Sau khi đã đưa bàn in về đúng vị trí, người dùng nhấn "Z = 0" để đặt lại gốc tọa độ Z, đảm bảo các lớp in sau sẽ chính xác. Sau bước căn chỉnh, quay

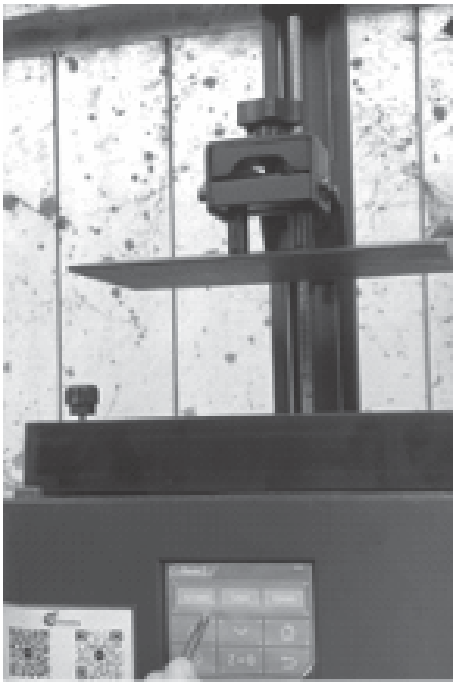
trở lại màn hình chính và chọn "Print" để chuẩn bị file in, đồng thời lúc này người dùng cần đổ resin (nhựa lỏng) vào khay in, đảm bảo mực đủ để in toàn bộ mô hình. Kiểm tra lại khay resin đã được lắp đúng cách và không có vật cản. Tất cả các thông tin và bước cài đặt được hiển thị rõ ràng trên màn hình cảm ứng như lựa chọn hệ thống (System), công cụ (Tool), và in (Print), giúp người dùng dễ dàng thao tác trước khi bắt đầu quá trình in 3D.

5.2. Vận hành thiết bị



Hình 2. Cài đặt thông số máy in

Máy in 3D resin hoạt động bằng cách sử dụng nhựa cảm quang lỏng được đổ vào khay in; đầu tiên, người dùng sẽ cân chỉnh bàn in bằng thao tác di chuyển trục Z sao cho bàn in sát mặt phim FEP trong khay resin, đảm bảo lớp đầu tiên in ra được dính chắc vào bề mặt; sau đó, màn hình LCD phía dưới khay sẽ hiển thị từng lớp cắt của mô hình, ánh sáng UV từ đèn LED chiếu xuyên qua các vùng hình ảnh này để làm đông cứng nhựa tại những khu vực mong muốn; khi một lớp đã được xử lý xong, bàn in sẽ từ từ nâng lên để lớp nhựa mới tràn vào chỗ cũ; quy trình này lặp lại liên tục, từng lớp một, cho đến khi toàn bộ mô hình được tạo thành; sau khi in hoàn tất, vật thể được nâng hẳn lên khỏi khay resin, và cần qua các bước hậu xử lý như rửa bằng cồn và chiếu UV để làm cứng hoàn toàn, được thể hiện như hình 1.



Hình 3. Nhập các thông số trước khi in

Ngoài ra, trong quá trình căn chỉnh bàn in, người dùng sử dụng một que nhọn để thao tác trên màn hình cảm ứng nhằm điều khiển độ cao trục Z; thao tác này giúp di chuyển bàn in lên xuống với độ chính xác cao mà không chạm tay trực tiếp vào màn hình, tránh sai lệch và giữ cho bề mặt luôn sạch sẽ.

5.3. Sản phẩm

a) Tổng quan

Sản phẩm có hình dạng giống mẫu thử kéo tiêu chuẩn (dạng dog-bone), được dùng phổ biến trong thử nghiệm cơ học vật liệu. Phần thân giữa có thiết kế dạng lưới với các cell hình trụ/hình hộp rỗng (đục lỗ). Hai đầu được giữ nguyên dạng khối đặc để gá kẹp khi thử nghiệm như hình 2. ☞

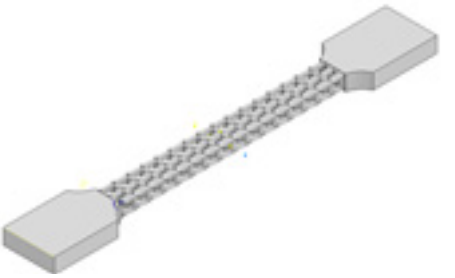


Hình 4. Sản phẩm sau khi in thử

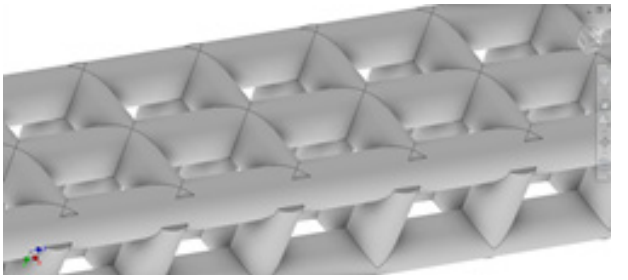
Cấu trúc dạng dog-bone (xương chó) là một thiết kế mẫu thử tiêu chuẩn được sử dụng rộng rãi trong các thí nghiệm kéo nhằm đánh giá đặc tính cơ học của vật liệu như độ bền kéo, độ giãn dài và mô đun đàn hồi; điểm nổi bật của thiết kế này là phần giữa được làm hẹp lại so với hai đầu, tạo ra vùng tập trung ứng suất rõ rệt, giúp đảm bảo quá trình đứt gãy xảy ra tại khu vực mong muốn thay vì ở các vị trí gá kẹp, từ đó tăng độ chính xác và độ tin cậy của kết quả thử nghiệm. Thiết kế này cũng giúp hạn chế các ảnh hưởng từ biến dạng cục bộ hoặc trượt tại đầu mẫu khi kẹp vào thiết bị kéo, đồng thời dễ dàng trong việc quan sát và đo lường biến dạng thực tế trong quá trình mẫu bị kéo đứt, đặc biệt phù hợp với các vật liệu in 3D, vật liệu composite hoặc vật liệu có cấu trúc rỗng cần kiểm chứng hiệu suất chịu lực trong điều kiện chuẩn hóa.

b) Thông số kích thước sản phẩm

Tổng quan về hình ảnh 3D được thể hiện qua hình 3 và kích thước, khoảng cách giữa các cell được thể hiện qua hình 5 và 6.



Hình 5. Hình dáng 3D của sản phẩm



Hình 6. Kích thước của cell

c) Phân tích

Dựa trên hình ảnh mô tả phần thân giữa của mẫu thử và thông tin chi tiết về cấu trúc ô lưới (cell) với đường kính 2 mm, chiều cao và chiều rộng đều là 5.5 mm, có thể nhận thấy rằng thiết kế mới đã được tối ưu theo hướng giảm mật độ vật liệu mà vẫn giữ được sự ổn định về hình dạng và cơ tính. Cụ thể, phần thân giữa của mẫu thử có cấu trúc lưới với các ô rỗng được phân bố đều, tạo thành dạng mạng lưới ba chiều, trong đó mỗi cell có hình dạng gần như hình hộp chữ nhật rỗng với cạnh bo tròn, góp phần giảm trọng lượng tổng thể của sản phẩm nhưng vẫn duy trì được khả năng chịu lực tốt nhờ vào sự phân bố tải trọng đều qua các thanh nối giữa các cell. Việc tăng đường kính cell lên 2 mm đã làm cho mật độ vật liệu giảm đi rõ rệt, các lỗ hở lớn hơn giúp dễ dàng quan sát biến dạng, đồng thời tăng khả năng hấp thụ năng lượng và giảm chấn trong các ứng dụng liên quan đến tải động hoặc mô phỏng mô mềm sinh học. Thiết kế này cũng đồng nghĩa với

việc giảm tiêu hao vật liệu in và thời gian sản xuất trong quy trình in 3D, đồng thời vẫn đảm bảo được tính toàn vẹn của cấu trúc trong suốt quá trình thử nghiệm cơ học. Từ hai mẫu giống nhau được đánh dấu ký hiệu "1" trong hình ảnh đầu tiên, có thể suy luận đây là các mẫu chuẩn hoặc mẫu đối chứng trong cùng một loạt thử nghiệm, nhằm kiểm tra tính lặp lại và độ tin cậy của thiết kế mới. Thực tế quan sát cho thấy không có dấu hiệu nứt vỡ hay biến dạng sau in, chứng tỏ rằng việc tăng đường kính cell không làm suy yếu cấu trúc một cách đáng kể mà ngược lại còn giúp cải thiện một số đặc tính cơ học nhất định nhờ thiết kế tối ưu hóa, từ đó làm nổi bật khả năng ứng dụng của sản phẩm trong các lĩnh vực yêu cầu tính nhẹ, linh hoạt và khả năng chịu tải cao như y sinh, thiết bị bảo hộ hoặc cấu trúc chịu lực nhẹ.

6. KẾT LUẬN

Tổng kết lại, việc ứng dụng công nghệ in 3D để tạo ra các cấu trúc lattice kết hợp với thiết kế mẫu dạng dog-bone đã mang lại nhiều ưu điểm vượt trội trong quá trình nghiên cứu và thử nghiệm cơ học vật liệu, đặc biệt là trong việc đánh giá hiệu quả của cấu trúc rỗng. Thiết kế dog-bone giúp tập trung ứng suất tại vùng giữa mẫu, cho phép kiểm tra chính xác tính chất cơ học của phần cấu trúc lattice mà không bị ảnh hưởng bởi gá kẹp, trong khi đó các ô cell có kích thước đường kính 2 mm, chiều cao và chiều rộng 5.5 mm được phân bố đều tạo nên một mạng lưới không gian nhẹ, thông thoáng nhưng vẫn đảm bảo độ bền và khả năng chịu tải tốt. Cấu trúc này không chỉ giúp giảm đáng kể khối lượng vật liệu và thời gian in, mà còn mang lại khả năng hấp thụ năng lượng, chống biến dạng và điều chỉnh đặc tính đàn hồi theo nhu cầu sử dụng, từ đó khẳng định tiềm năng ứng dụng rộng rãi của thiết kế trong các lĩnh vực y sinh, kỹ thuật cơ khí và các ngành công nghiệp đòi hỏi cấu trúc nhẹ nhưng bền vững.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phan Thị Đăng Thư;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Dương Quang Huy, Tạ Nguyễn Minh Đức, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn;

- Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Sơn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-372.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Zhou, B., Zhao, J. B., & Li, L. (2015), "*CNC double spiral tool-path generation based on parametric surface mapping*". Computer-Aided Design, 67–68, 87–106. https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.05.008

[2]. Ye, G. Y., Bi, H. J., & Hu, Y. C. (2020), "*Compression behaviors of 3D printed pyramidal lattice truss composite structures*". Composite Structures, 233, 111537. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111537

[3]. Pantz, O., & Trabelsi, K. (2008), "*A post-treatment of the homogenization method for shape optimization*". SIAM Journal on Control and Optimization, 47, 1380–1398. https://doi.org/10.1137/070703479

[4]. Xiong, J., Mines, R., Ghosh, R., Vaziri, A., Ma, L., Ohrndorf, A., & Wu, L. (2015), "*Advanced micro-lattice materials*". Advanced Engineering Materials, 17, 1253–1264. https://doi.org/10.1002/adem.201500106

[5]. Yi, B., Zhou, Y. Q., Yoon, G. H., & Saitou, K. (2019), "*Topology optimization of functionally-graded lattice structures with buckling constraints*". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 354, 593–619. https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.06.033

[6]. Koizumi, Y., Okazaki, A., Chiba, A., Kato, T., & Takezawa, A. (2016), "*Cellular lattices of biomedical Co-Cr-Mo-alloy fabricated by electron beam melting with the aid of shape optimization*". Additive Manufacturing, 12, 305–313. https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.008

[7]. Salonitis, K., Chantzis, D., & Kappatos, V. (2017), "*A hybrid finite element analysis and evolutionary computation method for the design of lightweight lattice components with optimized strut diameter*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90, 2689–2701. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9584-9

[8]. Guo, Q., Yao, W., Li, W., & Gupta, N. (2021), "*Constitutive models for the structural analysis of composite materials for the finite element analysis: A review of recent practices*". Composite Structures, 260, 113267. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113267

[9]. Verners, O., & Dobelis, M. (2010), "*Shape optimization of a superelement of hexagonal lattice structure*". Construction Science, 11, 66–76.

[10]. Zhai, X. Y., & Chen, F. L. (2019), "*Path planning of a type of porous structures for additive manufacturing*". Computer-Aided Design, 115, 218–230. https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.006

[11]. Tang, Y., Dong, G., Zhou, Q., & Zhao, Y. F. (2018), "*Lattice structure design and optimization with additive manufacturing constraints*". IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15, 1546–1562. https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2810248

[12]. Reinhart, G., & Teufelhart, S. (2013), "*Optimization of mechanical loaded lattice structures by orientating their struts along the flux of force*". Procedia CIRP, 12, 175–180. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.030

[13]. Niutta, C. B., Ciardiello, R., & Tridello, A. (2022), "*Experimental and numerical investigation of a lattice structure for energy absorption: Application to the design of an automotive crash absorber*". Polymers, 14, 1116. https://doi.org/10.3390/polym14061116

[14]. Mahendran, M. (2007), "*Applications of finite element analysis in structural engineering*". In Proceedings of the International Conference on Computer Aided Engineering (pp. 38–46). Indian Institute of Technology Madras.

[15]. Matthews, F. L., Davies, G. A. O., Hitchings, D., & Soutis, C. (2000), "*Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures*". Elsevier.

THIẾT KẾ MODULE HÀN THÉP

DESIGN OF STEEL WELDING MODULE

Nguyễn Hữu Phước, Trương Minh Trí, Nguyễn Lê Tường, Nguyễn Hải Hoàn*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22143149@student.hcmute.edu.vn;
tritm@hcmute.edu.vn;
tuongnl@hcmute.edu.vn;
**hoannh@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài nghiên cứu tập trung vào việc thiết kế và tối ưu hóa một module hàn thép tấm, nhằm nâng cao hiệu quả hàn cũng như đảm bảo độ ổn định và chất lượng của mối hàn trong môi trường công nghiệp. Các yếu tố kỹ thuật như dạng mối hàn, phân bố nhiệt độ, kết cấu kẹp giữ, và điều khiển vị trí được khảo sát và mô phỏng bằng phần mềm chuyên dụng. Bằng cách phân tích nhiều cấu hình và tham số thiết kế, nghiên cứu đề xuất một mô hình module hàn có hiệu suất cao, thích hợp ứng dụng trong sản xuất tự động.

Từ khóa: *Hàn thép tấm; Module hàn; Mô phỏng nhiệt; Tự động hóa; Tối ưu thiết kế.*

ABSTRACT

The research focuses on the design and optimization of a sheet steel welding module, aiming to improve welding efficiency as well as ensure the stability and quality of welds in industrial environments. Technical factors such as weld joint type, temperature distribution, clamping structure, and positional control are analyzed and simulated using specialized software. By evaluating various configurations and design parameters, the study proposes a high-performance welding module model suitable for application in automated manufacturing systems.

Keywords: *Sheet steel welding; Welding module; Thermal simulation; Automation; Design optimization.*

1. TỔNG QUAN

Hàn là một trong những quy trình cốt lõi trong sản xuất cơ khí, đặc biệt trong chế tạo kết cấu kim loại như thép tấm, đóng vai trò quan trọng trong nhiều ngành công nghiệp từ xây dựng, ô tô đến hàng không vũ trụ [1]. Với yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác, năng suất và tính tự động hóa, việc thiết kế một module hàn chuyên dụng cho thép tấm trở nên cần thiết để đáp ứng các hệ thống sản xuất hiện đại [2]. Các module hàn truyền thống thường gặp phải những hạn chế như phân bố nhiệt không đồng đều, độ ổn định vị trí thấp và khó khăn trong việc tích hợp vào dây chuyền tự động [3]. Những vấn đề này không chỉ làm giảm chất lượng mối hàn mà còn ảnh hưởng đến hiệu quả sản xuất quy mô lớn, dẫn đến tăng chi phí và thời gian chế tạo [4]. Do đó, việc phát triển một module hàn hiện đại với cơ chế điều khiển linh hoạt, khả năng quản lý nhiệt tối ưu và tính tương thích cao với các hệ thống tự động hóa là một hướng đi quan trọng nhằm đáp ứng xu hướng công nghiệp 4.0 [5].

Nghiên cứu này tập trung vào thiết kế một module hàn thép cải tiến, nhằm khắc phục các hạn chế của các hệ thống hàn thông thường và nâng cao hiệu quả sản xuất [1]. Module được thiết kế với ba tính năng chính để giải quyết các vấn đề hiện tại. Đầu tiên, module đảm bảo phân bố nhiệt đồng đều trong suốt quá trình hàn, giảm thiểu các khuyết tật phổ biến trên thép tấm như cong vênh, biến dạng nhiệt hoặc nứt gãy [2]. Điều này được thực hiện thông qua việc kiểm soát chính xác các thông số hàn, bao gồm cường độ dòng điện, điện áp và tốc độ hàn, được điều chỉnh phù hợp với đặc tính vật liệu thép [3]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng sự không đồng đều trong phân bố nhiệt là nguyên nhân chính dẫn đến ứng suất dư trong mối hàn, làm giảm độ bền và tuổi thọ của kết cấu thép [4]. Do đó, module hàn này tích hợp các cảm biến nhiệt độ và hệ thống điều khiển thời gian thực để duy trì nhiệt độ ổn định trong vùng hàn [5].

Thứ hai, module tăng cường độ ổn định vị trí thông qua hệ thống kẹp chắc chắn và cơ chế giám sát thời gian thực [6]. Độ ổn định vị trí là yếu tố quan trọng để đảm bảo căn chỉnh chính xác giữa các tấm thép trong suốt quá trình hàn, đặc biệt khi thực hiện các mối hàn dài hoặc phức tạp [7]. Hệ thống kẹp được thiết kế với lực giữ đồng đều, kết hợp với các cảm biến vị trí để phát hiện và điều chỉnh kịp thời các sai lệch nhỏ trong quá trình hàn [8]. Điều này không chỉ cải thiện độ chính xác của mối hàn mà còn giảm nguy cơ khuyết tật do dịch chuyển vật liệu, từ đó nâng cao chất lượng tổng thể của sản phẩm [6]. Ngoài ra, hệ thống giám sát thời gian thực cung cấp dữ liệu liên tục về vị trí và trạng thái mối hàn, cho phép điều chỉnh nhanh chóng để duy trì hiệu suất tối ưu [7].

Thứ ba, module hàn được thiết kế với tính tương thích cao, cho phép tích hợp dễ dàng vào các dây chuyền sản xuất tự động hiện có [8]. Tính năng này được đảm bảo thông qua các giao diện module hóa, hỗ trợ kết nối với cánh tay robot, cảm biến và phần mềm điều khiển [1]. Trong bối cảnh các nhà máy sản xuất ngày càng chuyển đổi sang mô hình tự động hóa, khả năng tích hợp của module hàn là một yếu tố quan trọng để đảm bảo tính linh hoạt và hiệu quả trong sản xuất [2]. Ví dụ, module có thể được lập trình để phối hợp với các hệ thống robot hàn, cho phép thực hiện các mối hàn phức tạp với độ chính xác cao và tốc độ nhanh hơn so với hàn thủ công [3]. Ngoài ra, phần mềm điều khiển tích hợp cho phép người vận hành theo dõi và điều chỉnh các thông số hàn từ xa, giảm thiểu thời gian ngừng máy và tăng năng suất tổng thể [4].

Bằng cách khắc phục các hạn chế của hệ thống hàn truyền thống, module hàn thép được đề xuất trong nghiên cứu này mang lại nhiều lợi ích đáng kể. Trước hết, module nâng cao chất lượng mối hàn thông qua việc giảm thiểu khuyết tật và đảm bảo độ đồng đều, từ đó tăng độ bền và độ tin cậy của các kết cấu thép [5]. Thứ hai, module giảm thời gian sản xuất nhờ khả năng tự động hóa và kiểm soát chính xác, giúp các doanh nghiệp tối ưu hóa quy trình sản xuất và đáp ứng nhanh chóng nhu cầu thị trường [6]. Cuối cùng, module cải thiện hiệu quả kinh tế bằng cách giảm chi phí liên quan đến sửa chữa khuyết tật và tiêu hao vật liệu, đồng thời hỗ trợ sản xuất bền vững thông qua việc tối ưu hóa sử dụng năng lượng và vật liệu [7].

Về mặt ứng dụng, module hàn thép này có tiềm năng lớn trong nhiều ngành công nghiệp, từ chế tạo kết cấu thép cho xây dựng, sản xuất khung xe trong ngành ô tô, đến chế tạo các bộ phận máy móc trong ngành cơ khí [8]. Việc áp dụng công nghệ này không chỉ đáp ứng các yêu cầu khắt khe của sản xuất hiện đại mà còn góp phần nâng cao năng lực cạnh tranh của các doanh nghiệp Việt Nam trên thị trường quốc tế [1]. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng sang việc tích hợp các công nghệ tiên tiến hơn, chẳng hạn như trí tuệ nhân tạo để dự đoán và điều chỉnh thông số hàn, hoặc thử nghiệm với các loại vật liệu thép mới để đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đặc thù [2]. Những nỗ lực này không chỉ mang ý nghĩa kỹ thuật mà còn đóng góp vào sự phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí trong nước, hỗ trợ hội nhập sâu hơn vào chuỗi giá trị toàn cầu [3].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Hàn điện hồ quang là phương pháp sử dụng điện cực nóng chảy để tạo ra nhiệt độ cao, làm nung chảy thép tấm và hình thành mối hàn. Quá trình này đòi hỏi kiểm soát chặt chẽ các thông số để đảm bảo chất lượng mối hàn. Nhiệt độ đóng vai trò quan trọng, nhưng nếu phân bố nhiệt không đồng đều, mối hàn có thể xuất hiện các khuyết tật như nứt, cong vênh hoặc suy giảm độ bền kết cấu. Do đó, việc thiết kế module hàn cần tập trung vào quản lý nhiệt hiệu quả để giảm thiểu các vấn đề này.

Module kẹp giữ là một thành phần quan trọng trong hệ thống hàn, đảm bảo thép tấm được cố định chắc chắn trong suốt quá trình. Module này cần có khả năng chống biến dạng do nhiệt, đồng thời hỗ trợ truyền nhiệt hợp lý để tránh tích tụ nhiệt cục bộ. Ngoài ra, nó phải duy trì vị trí ổn định của thép tấm, ngăn chặn dịch chuyển do giãn nở nhiệt hoặc rung động, từ đó đảm bảo độ chính xác của mối hàn.

Để tối ưu hóa thiết kế, việc ứng dụng phần mềm mô phỏng như ANSYS hoặc Solidworks Simulation là cần thiết. Các phần mềm này cho phép mô phỏng phân bố nhiệt độ, ứng suất và biến dạng trong quá trình hàn, giúp dự đoán các vấn đề tiềm ẩn và điều chỉnh thiết kế trước khi chế tạo. Nhờ đó, module hàn có thể được tinh chỉnh để đạt hiệu suất tối ưu, giảm thiểu khuyết tật và nâng cao độ bền của kết cấu thép.

Việc kết hợp nguyên lý hàn điện hồ quang, quản lý nhiệt, thiết kế module kẹp giữ và công cụ mô phỏng tạo nền tảng lý thuyết vững chắc cho việc phát triển một module hàn thép hiệu quả, đáp ứng yêu cầu của sản xuất hiện đại.

3. MÔ PHỎNG

Module hàn thép tấm là một tổ hợp hệ thống cơ điện tử tự động, được thiết kế chuyên ☞

biệt để phục vụ cho các dây chuyền sản xuất công nghiệp gia công kim loại tấm, đặc biệt là trong các công đoạn hàn liên kết các chi tiết bằng thép cacbon hoặc thép hợp kim. Hệ thống này không chỉ giúp nâng cao năng suất, đảm bảo độ chính xác và tính lặp lại của quá trình hàn, mà còn cho phép kiểm soát chất lượng mối hàn một cách toàn diện, phù hợp với các tiêu chuẩn công nghiệp hiện đại.

***Cấu trúc tổng thể của module hàn:**

Cấu trúc chính của module bao gồm các thành phần sau:

• Khung đỡ chính: Là phần kết cấu chịu lực chính, thường được chế tạo bằng thép tổ hợp hoặc nhôm định hình nhằm đảm bảo độ cứng vững, giảm rung động trong quá trình vận hành.

• Bàn gá định vị thép tấm: Có nhiệm vụ cố định các tấm thép trước khi hàn, đảm bảo vị trí chính xác, hạn chế biến dạng do nhiệt khi hàn.

• Cơ cấu dẫn động mỏ hàn theo trục XY: Mỏ hàn được gắn trên một cơ cấu chuyển động hai trục (X-Y) sử dụng thanh trượt tuyến tính và trục vít me để tạo chuyển động chính xác, đảm bảo đường hàn đều đặn, đúng theo thiết kế.

• Hệ thống điều khiển lập trình PLC: Đây là bộ não của toàn bộ module, lập trình linh hoạt để điều khiển các chuyển động, thiết lập thông số hàn như dòng điện (I), điện áp (U), tốc độ hàn (v), thời gian hàn và thời gian ngắt, giúp tối ưu quá trình.

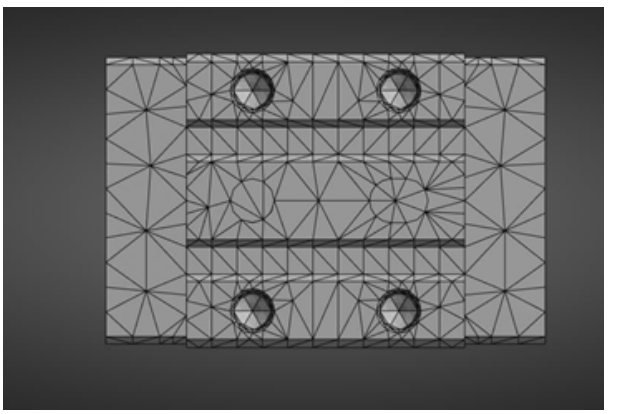
• Mỏ hàn MIG (Metal Inert Gas): Sử dụng phổ biến trong hàn thép, đặc biệt phù hợp với các ứng dụng tự động hóa nhờ hồ quang ổn định, khả năng hàn nhanh, mối hàn đẹp và dễ kiểm soát.

• Cảm biến và hệ thống theo dõi mối hàn: Cảm biến quang hoặc cảm biến tiếp xúc được bố trí để xác định chính xác vị trí đầu mối hàn, mép tấm, đồng thời thu thập dữ liệu thực trong suốt quá trình hàn.

Toàn bộ module có thể được tích hợp linh hoạt trong các dây chuyền sản xuất lớn hoặc được vận hành như một thiết bị độc lập trong các xưởng cơ khí chuyên dụng.

(*) Phân tích mô phỏng các chi tiết cấu kiện trong module

Nhằm đánh giá độ bền và độ cứng vững của các chi tiết cơ khí trong module, nhóm nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS Mechanical, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để tính toán ứng suất, biến dạng, đồng thời xác định những vùng có nguy cơ phá hủy cao khi làm việc dưới tải trọng.



Hình 3.1. Miếng đỡ thanh trượt

Hình 3.1 thể hiện mô hình mô phỏng miếng đỡ thanh trượt, một chi tiết quan trọng có nhiệm vụ đỡ và dẫn hướng chuyển động của

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

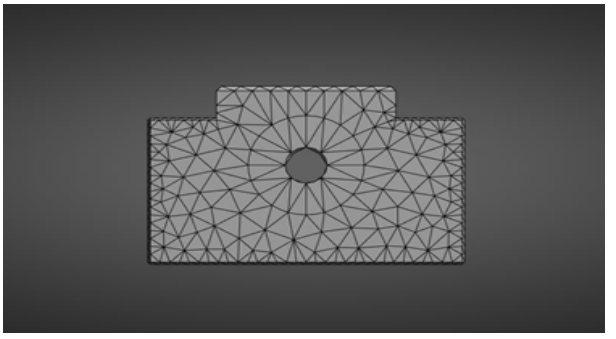
mỏ hàn dọc theo trục. Chi tiết này được mô phỏng với vật liệu là thép C45, mô đun đàn hồi E = 210 GPa, hệ số Poisson ν = 0.3.

Điều kiện biên áp dụng:

• Liên kết cố định (Fixed Support): Tại các lỗ bắt bu lông liên kết với khung chính;

• Tải trọng phân bố (Surface Pressure): Mô phỏng lực tiếp xúc giữa thanh trượt và mỏ hàn, với giá trị khoảng 150 N theo phương vuông góc với bề mặt đỡ.

Kết quả mô phỏng cho thấy ứng suất lớn nhất tập trung tại các góc liên kết, với giá trị nhỏ hơn giới hạn chảy của vật liệu, đảm bảo an toàn làm việc.



Hình 3.2. Gối đỡ trục vít me

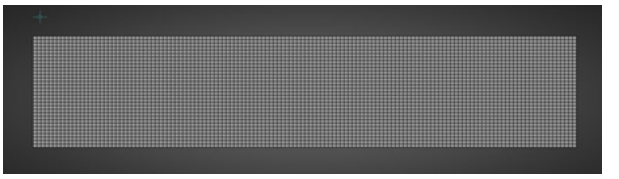
Hình 3.2. trình bày kết quả mô phỏng gối đỡ trục vít me, là chi tiết truyền tải lực từ động cơ đến cơ cấu dẫn động XY.

Điều kiện biên:

• Ràng buộc cứng (Fixed): Ở chân đế, nơi gối đỡ được bắt chặt với khung;

• Lực tập trung (Force): Áp dụng tải trọng trục dọc theo chiều vít me, giá trị khoảng 500 N, mô phỏng lực tác dụng từ momen xoắn của động cơ.

Mô hình cho thấy biến dạng tập trung chủ yếu tại vùng tiếp giáp giữa ổ lăn và trục, tuy nhiên vẫn nằm trong giới hạn cho phép. Mức ứng suất chính Von-Mises thấp hơn giới hạn chảy của thép chế tạo (~250 MPa), đảm bảo khả năng chịu tải lâu dài.



Hình 3.3. Mô phỏng ba tấm phôi thép

Hình 3.3 mô tả mô hình mô phỏng ba tấm phôi thép được kẹp chặt và chuẩn bị hàn. Việc mô phỏng này nhằm đánh giá ứng suất dư và biến dạng nhiệt trong quá trình hàn MIG.

Thông số vật liệu mô phỏng:

• Vật liệu: Thép hợp kim thấp (Low alloy steel);
• Mô đun đàn hồi: E = 210 Gpa;
• Hệ số dãn nở nhiệt: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/°C$;
• Nhiệt dung riêng: c = 470 J/kg•K;
• Truyền nhiệt: Mô hình dẫn nhiệt Fourier 3D.

Điều kiện biên:

• Ràng buộc dịch chuyển (Displacement Constraint): Tại các cạnh dưới mô phỏng bàn gá cố định tấm thép.

• Tải nhiệt (Thermal Load): Áp dụng nhiệt độ hồ quang hàn tại mép nối, nhiệt độ cực đại khoảng 1200°C, phân bố theo dạng Gauss.

• Tản nhiệt (Convection + Radiation): Tản nhiệt qua không khí với hệ số đối lưu h = 15 W/m²•K và bức xạ ε = 0.85.

Mô phỏng cho thấy sự xuất hiện vùng biến dạng dẻo cục bộ gần mép hàn, đồng thời ☞

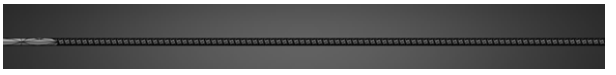
ứng suất dư sau khi nguội có xu hướng tập trung tại rìa mối hàn. Các kết quả này có thể được dùng để cải tiến quy trình hàn, giảm nguy cơ nứt hoặc cong vênh sau khi hàn.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Trong mô phỏng module hàn thép tấm, hệ thống dẫn hướng chuyển động được thiết kế dựa trên sự kết hợp giữa trục vít me thường và thanh nhôm định hình nhằm đảm bảo độ chính xác và tính linh hoạt trong lắp ráp. Trục vít me đảm nhận vai trò truyền động tuyến tính cho cụm mỏ hàn theo các trục X và Y, sử dụng động cơ bước để điều khiển đai ốc me trượt dọc theo trục khi quay. Thanh nhôm định hình loại 30x30, được sử dụng làm khung đỡ chính, tạo nên hệ kết cấu nhẹ, chắc chắn và dễ dàng tùy biến. Các khớp nối, bạc trượt và gối đỡ được gắn trực tiếp vào rãnh trượt của nhôm định hình bằng các bu lông chuyên dụng, tạo nên một hệ chuyển động ổn định và dễ bảo trì. Trong quá trình mô phỏng bằng phần mềm ANSYS, toàn bộ kết cấu này được kiểm tra chuyển động tuyến tính, vùng làm việc, cũng như độ chính xác vị trí mỏ hàn, giúp đánh giá và tối ưu hóa thiết kế trước khi đưa vào chế tạo thực tế.



Hình 4.1. Khung nhôm được mô phỏng trên phần mềm ANSYS



Hình 4.2. Mô phỏng độ cong của trục vitme khi bị trọng lượng đè xuống trên phần mềm ANSYS

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong quá trình thiết kế và phát triển module hàn tự động, việc tối ưu hóa các thành phần cấu trúc và cơ khí đóng vai trò quan trọng nhằm đảm bảo hiệu suất, độ chính xác và an toàn của hệ thống. Một trong những yếu tố thiết yếu của thiết bị là việc sử dụng đệm gỗ để cách điện giữa phôi kim loại và các bộ phận dẫn điện như khung gá hoặc các chi tiết truyền dẫn dòng điện. Đệm gỗ không chỉ đảm bảo an toàn cho hệ thống và người vận hành mà còn được thiết kế với bề mặt tăng cường ma sát, giúp cố định phôi chắc chắn, ngăn ngừa hiện tượng trượt trong quá trình hàn. Nhờ đặc tính này, phôi kim loại được giữ ổn định, giảm thiểu sai lệch vị trí, từ đó nâng cao chất lượng mối hàn. Hình 5.1, mô hình 3D của thiết bị, thể hiện rõ vị trí và vai trò của đệm gỗ trong cấu trúc tổng thể, minh họa cách nó được tích hợp để hỗ trợ quá trình hàn hiệu quả.

Khung nhôm 30x30 là một thành phần quan trọng khác trong thiết kế của module hàn. Sau khi thực hiện các thay đổi thiết kế, khung nhôm được cải tiến với việc bổ sung các gân tăng cứng, giúp tăng khả năng chịu tải và độ bền cơ học. Chiều dài của khung được điều chỉnh phù hợp với không gian làm việc, đảm bảo không gian vận hành tối ưu mà vẫn duy trì tính linh hoạt trong lắp ráp. Hệ thống rãnh tiêu chuẩn trên khung nhôm cho phép dễ dàng định vị và kết nối với các bộ phận khác trong cấu trúc tổng thể, giảm thời gian lắp đặt và tăng tính chính xác. Hình 5.1 cũng minh họa rõ ràng cách khung nhôm 30x30 được tích hợp vào mô hình 3D, thể hiện sự chắc chắn và tính thẩm mỹ của thiết kế.

Bàn gá, một thành phần không thể thiếu của module hàn, đã được cải tiến đáng kể trong phiên bản mới. Thiết kế bàn gá hiện nay được bổ sung các rãnh lắp đặt kẹp, giúp cố định vật hàn một cách chắc chắn và linh hoạt hơn. Khoảng cách giữa các gờ kẹp được điều chỉnh để phù hợp với kích thước của các tấm thép tiêu chuẩn, từ đó hỗ trợ quá trình gá đặt

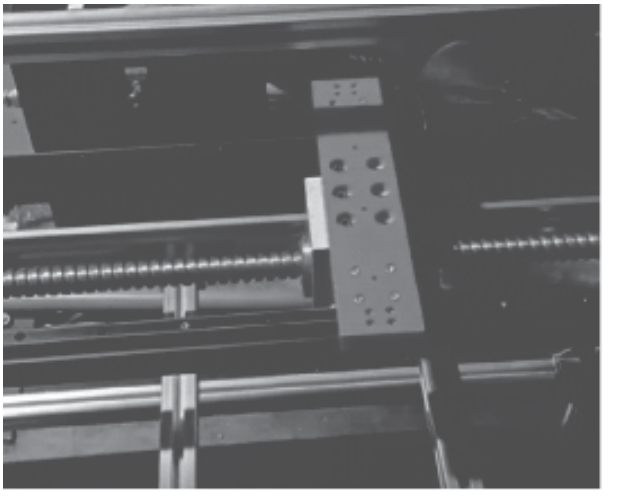
nhanh chóng và chính xác. Nhờ những cải tiến này, bàn gá không chỉ tăng độ ổn định của phôi trong quá trình hàn mà còn giảm thiểu thời gian chuẩn bị, nâng cao hiệu suất sản xuất. Hình 5.2, kiểm tra băng trượt, gián tiếp cho thấy sự liên kết giữa bàn gá và các bộ phận khác, đảm bảo rằng các kẹp cố định hoạt động hiệu quả trong việc giữ phôi tại vị trí mong muốn.

Trục vitme cũng là một bộ phận được tối ưu hóa để đáp ứng các yêu cầu khắt khe của module hàn. Kết quả mô phỏng cho thấy trục vitme sau khi cải tiến có độ dài phù hợp với hành trình yêu cầu, kết hợp tốt với đai ốc chống rơ để đảm bảo chuyển động tuyến tính mượt mà. Đặc biệt, thiết kế mới loại bỏ hiện tượng lệch trục khi kết nối với động cơ, từ đó tăng độ chính xác và độ bền của hệ thống. Hình 5.1, với góc nhìn chi tiết của mô hình 3D, minh họa rõ ràng cách trục vitme được tích hợp vào cấu trúc tổng thể, đảm bảo sự đồng bộ trong chuyển động của các bộ phận liên quan.



Hình 5.1. Mô hình 3D của thiết bị

Khung bàn gá mới được thiết kế với kết cấu chắc chắn hơn, hỗ trợ việc điều chỉnh vị trí của đầu hàn theo nhiều hướng khác nhau. Kết quả mô phỏng tải trọng cho thấy khung bàn gá có khả năng chịu lực tốt, hạn chế rung lắc trong quá trình vận hành. Cấu trúc lắp ráp hợp lý của khung bàn gá không chỉ mang lại sự tiện lợi trong việc bảo trì mà còn đảm bảo tính linh hoạt khi cần thay đổi vị trí hàn. Hình 5.3, cơ cấu súng hàn, cung cấp cái nhìn chi tiết về cách khung bàn gá hỗ trợ đầu hàn, đảm bảo sự ổn định và chính xác trong quá trình thực hiện mối hàn.



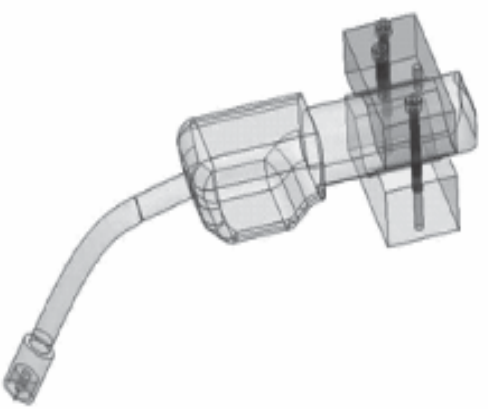
Hình 5.2. Kiểm tra băng trượt

Thanh trượt là một cải tiến đáng chú ý khác trong thiết kế module hàn. Phiên bản mới của thanh trượt được tích hợp ray dẫn hướng và con trượt bi, giúp giảm ma sát và đảm bảo chuyển động mượt mà. Nhờ đó, độ chính xác trong định vị đầu hàn được cải thiện đáng kể, đồng thời giảm sai lệch trong quá trình vận hành. Hình 5.2, kiểm tra băng trượt, minh họa rõ ràng hiệu quả của thanh trượt mới, với các con trượt bi hoạt động trơn tru trên ray dẫn hướng, đảm bảo sự ổn định và chính xác của hệ thống.

Cơ cấu dao động của súng hàn, được thể hiện chi tiết trong Hình 5.4, đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng mối hàn. Cơ cấu này cho phép súng hàn di chuyển theo các quỹ đạo được lập trình, đảm bảo sự phân bố nhiệt độ đồng đều và hình dạng mối hàn tối ưu. Kết quả mô phỏng 3D cho thấy rằng ☞

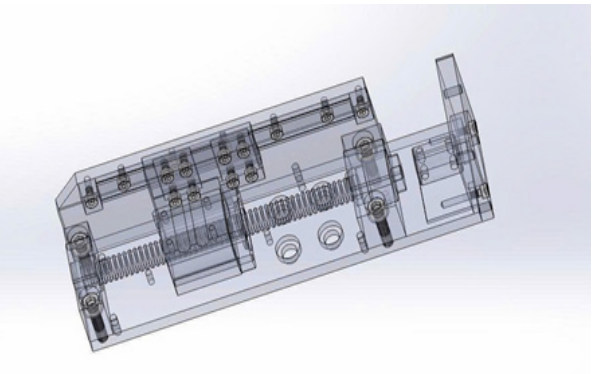
sau các thay đổi thiết kế, module hàn không chỉ cải thiện về tính cơ học và độ ổn định mà còn nâng cao khả năng tương thích với hệ thống điều khiển tự động. Các kết cấu được tối ưu hóa giúp hệ thống vận hành hiệu quả hơn và dễ dàng bảo trì trong điều kiện thực tế.

Thông qua việc khảo sát nhiều biến thể thiết kế của module hàn, nghiên cứu đã chỉ ra rằng hình dạng mối hàn, lực ép và sự phân bố nhiệt độ đồng đều là những yếu tố then chốt quyết định chất lượng sản phẩm. Module hàn được trang bị cơ cấu kẹp linh hoạt, tích hợp cảm biến nhiệt độ và hệ thống điều khiển hành trình tự động đã thể hiện hiệu suất vượt trội trong các thử nghiệm thực tế. Việc mô phỏng các kịch bản hoạt động cho phép nhóm nghiên cứu dự đoán trước các điểm yếu tiềm năng, từ đó điều chỉnh thiết kế kịp thời để giảm thiểu sai số. Những cải tiến này không chỉ rút ngắn thời gian thiết kế mà còn tăng hiệu quả triển khai trong môi trường sản xuất thực tế. Các hình ảnh minh họa, từ Hình 5.1 đến Hình 5.4, cung cấp cái nhìn trực quan về sự tiến bộ trong thiết kế, giúp làm rõ cách các bộ phận được tối ưu hóa để đạt được hiệu suất cao nhất.



Hình 5.3. Cơ cấu súng hàn

Tóm lại, module hàn sau khi được cải tiến đã đạt được những bước tiến đáng kể về độ bền, độ chính xác và tính linh hoạt. Các thành phần như đệm gỗ, khung nhôm, bàn gá, trục vitme, thanh trượt và cơ cấu súng hàn đều được thiết kế và tích hợp một cách đồng bộ, đảm bảo hiệu quả vận hành tối ưu. Những kết quả này không chỉ khẳng định tiềm năng của module hàn trong các ứng dụng công nghiệp mà còn đặt nền tảng cho các nghiên cứu và phát triển tiếp theo trong lĩnh vực tự động hóa sản xuất.



Hình 5.4. Cơ cấu dao động súng hàn

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất một hướng tiếp cận toàn diện trong thiết kế module hàn thép tấm, với trọng tâm là tối ưu hóa phân bố nhiệt, cấu trúc kẹp giữ và hệ thống điều khiển tự động. Kết quả cho thấy module được thiết kế phù hợp có thể nâng cao hiệu quả hàn, giảm tỷ lệ lỗi và tăng năng suất trong môi trường sản xuất công nghiệp hiện đại.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phan Thị Đăng Thư;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Hữu Phước, Trương Minh Trí, Nguyễn Lê Tường, Nguyễn Hải Hoàn.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-341.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Huo, D., & Cheng, K. (2008), "*A dynamics-driven approach to the design of precision machine tools for micro-manufacturing and its implementation perspectives*". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 222(1), 1–13.

[2]. Altintas, A. (2000), "*Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*". Cambridge University Press.

[3].t Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., & Ehmann, K. F. (2004), "*The mechanics of machining at the microscale: Assessment of the current state of the science*". Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126(4), 666–678.

[4]. Erdel, B. P. (2003), "*High Speed Machining*". Society of Manufacturing Engineers.

[5]. Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2006), "*Metal Cutting Theory and Practice*" (2nd ed.). Taylor & Francis.

[6]. Ehmann, K. F., Bourell, D., Culpepper, M. L., Hodgson, T. J., Kurfess, T. R., Madou, M., Rajurkar, K., & De Vor, R. E. (2005), "*International assessment of research and development in micromanufacturing*". World Technology Evaluation Center.

[7]. Luo, X., Cheng, K., Webb, D., & Wardle, F. (2005), "*Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components*". Journal of Materials Processing Technology, 167(2-3), 515–528.

[8]. Zaeh, M., & Siedl, D. (2007), "*A new method for simulation of machining performance by integrating finite element and multi-body simulation for machine tools*". Annals of the CIRP, 56(1), 383–386.

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CHI TIẾT CHỊU UỐN CÓ DÙNG KẾT CẤU LATTICE

RESEARCH ON FABRICATION OF BENDING-RESISTANT PARTS USING LATTICE STRUCTURES

Trần Xuân Hoàng, Nguyễn Văn Tú, Nguyễn Quang Sáng, Tạ Nguyễn Minh Đức*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22144098@student.hcmute.edu.vn;
tunv@hcmute.edu.vn;
sangnq@hcmute.edu.vn;
**ductnm@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice nhằm tối ưu hóa trọng lượng và độ bền cơ học của chi tiết. Kết cấu lattice là một mạng lưới các thanh kết nối với nhau, giúp giảm vật liệu mà vẫn đảm bảo khả năng chịu lực tốt, đặc biệt là trong các ứng dụng yêu cầu tiết kiệm trọng lượng như hàng không, ô tô, và xây dựng. Các phương pháp chế tạo chủ yếu bao gồm in 3D và gia công CNC, cho phép sản xuất các chi tiết có cấu trúc phức tạp mà không cần khuôn mẫu. Việc phân tích các đặc tính uốn của kết cấu lattice giúp tối ưu hóa thiết kế để đạt hiệu suất tối đa. Nghiên cứu này hướng đến việc cải thiện hiệu quả vật liệu, giảm chi phí và nâng cao tính linh hoạt trong sản xuất.

Từ khóa: *Chi tiết chịu uốn; Kết cấu lattice; Độ bền cơ học; Mạng lưới thanh kết nối.*

ABSTRACT

Research on manufacturing bending-resistant components using lattice structures aims to optimize the weight and mechanical strength of the components. Lattice structures, which consist of a network of interconnected struts, help reduce material usage while maintaining excellent load-bearing capacity. These structures are particularly advantageous in applications requiring weight savings, such as aerospace, automotive, and construction. The primary manufacturing methods include 3D printing and CNC machining, allowing the production of complex structures without molds. Analyzing the bending properties of lattice structures helps to optimize the design for maximum performance. This research focuses on improving material efficiency, reducing costs, and enhancing flexibility in production.

Keywords: *Bending-resistant components; Lattice structure; Mechanical strength; Network of interconnected struts.*

1. TỔNG QUAN

Sự phát triển của các ngành công nghiệp hiện đại như hàng không vũ trụ, ô tô, và y sinh đòi hỏi các chi tiết cơ khí có trọng lượng nhẹ, độ bền cao, và khả năng chịu tải tối ưu. Kết cấu lattice, với đặc trưng là mạng lưới ô không gian định kỳ, đã trở thành giải pháp tiềm năng cho các chi tiết chịu uốn nhờ khả năng giảm trọng lượng và duy trì hiệu suất cơ học [1]. Phần tổng quan này trình bày các đặc điểm của kết cấu lattice, ứng dụng trong chi tiết chịu uốn, phương pháp chế tạo, và những thách thức cần giải quyết để thúc đẩy ứng dụng thực tiễn.

(*) Đặc điểm của kết cấu lattice:

Kết cấu lattice là hệ thống các thanh, nút hoặc ô lặp lại trong không gian ba chiều, tạo ra cấu trúc nhẹ nhưng cứng vững. Đặc tính nổi bật của lattice là khả năng phân bố tải trọng đồng đều, giảm khối lượng so với vật liệu đặc, và cung cấp độ bền cao trong các ứng dụng chịu lực phức tạp [2]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng lattice có thể được thiết kế với các ô hình học như body-centered cubic (BCC) hoặc octet-truss để tối ưu hóa khả năng chịu uốn, nén, hoặc hấp thụ năng lượng [3]. Tính linh hoạt này cho phép tùy chỉnh cấu trúc theo yêu cầu cụ thể, chẳng hạn như trong các bộ phận giảm chấn hoặc khung kết cấu [4].

Việc thiết kế lattice được hỗ trợ bởi các công cụ tối ưu hóa tô pô, giúp điều chỉnh mật độ và hình dạng ô để đạt hiệu suất tối ưu [5]. Tuy nhiên, hiệu quả của kết cấu lattice phụ thuộc không chỉ vào thiết kế mà còn vào vật liệu và kỹ thuật chế tạo, vốn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo tính khả thi.

(*) Ứng dụng trong chi tiết chịu uốn:

Chi tiết chịu uốn, như dầm, thanh ngang, hoặc bộ phận kết cấu trong máy bay, yêu cầu sự cân bằng giữa độ bền, độ cứng, và trọng lượng. Kết cấu lattice thay thế lõi đặc bằng mạng lưới ô rỗng, giúp giảm khối lượng đáng kể mà vẫn đảm bảo khả năng chịu tải [6]. Trong hàng không vũ trụ, các bộ phận như cánh quạt hoặc khung thân sử dụng lattice đã giảm tới 30% trọng lượng so với thiết kế truyền thống, đồng thời duy trì độ bền uốn [7].

Trong y sinh, lattice được ứng dụng trong cấy ghép xương nhân tạo, nơi cấu trúc xốp mô phỏng đặc tính cơ học của xương, cải thiện tích hợp sinh học [8]. Những ứng dụng này minh chứng tiềm năng của lattice trong việc đáp ứng các yêu cầu phức tạp của chi tiết chịu uốn, từ công nghiệp đến y tế.

Công nghệ chế tạo bồi đắp (additive manufacturing - AM), hay in 3D, đã cách mạng hóa việc sản xuất kết cấu lattice. Các kỹ thuật như Selective Laser Melting (SLM) và Electron Beam Melting (EBM) cho phép tạo ra các cấu trúc lưới phức tạp với độ chính xác cao, đặc biệt khi sử dụng kim loại như titan hoặc hợp kim nhôm [9]. SLM nổi bật nhờ khả năng xử lý vật liệu kim loại, phù hợp với chi tiết chịu uốn trong môi trường khắc nghiệt [10].

Tuy nhiên, AM gặp hạn chế về độ chính xác với ô lattice kích thước nhỏ (dưới 1 mm) do co ngót nhiệt hoặc lỗi bề mặt [1]. Chi phí vận hành cao và thời gian sản xuất dài cho các chi tiết lớn cũng là rào cản [2]. Để khắc phục, các phương pháp kết hợp AM với gia công CNC đã được đề xuất để cải thiện chất lượng bề mặt và độ chính xác [3]. Ngoài AM, đúc đầu tư hoặc ép phun cũng được sử dụng cho lattice đơn giản, nhưng bị giới hạn bởi độ phức tạp hình học [4].

Mặc dù có nhiều ưu điểm, kết cấu lattice đối mặt với các thách thức lớn. Thứ nhất, việc dự đoán hành vi cơ học dưới tải uốn là phức ☞

tạp. Các mô hình phần tử hữu hạn (FEM) yêu cầu tài nguyên tính toán lớn để mô phỏng cấu trúc lưới, đặc biệt khi có khuyết tật vi mô như lỗ rỗ hoặc nứt [5]. Những khuyết tật này có thể làm giảm độ bền chi tiết, đòi hỏi kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt [6]. Thứ hai, tối ưu hóa thiết kế lattice vẫn là vấn đề khó. Các thuật toán tô pô hiện nay chưa hoàn toàn cân bằng được giữa hiệu suất, chi phí, và tính khả thi chế tạo [7]. Thiếu tiêu chuẩn thiết kế và kiểm tra chất lượng cho lattice cũng hạn chế ứng dụng rộng rãi [8]. Cuối cùng, lựa chọn vật liệu là yếu tố then chốt. Kim loại như titan mang lại độ bền cao nhưng chi phí đắt đỏ, trong khi polymer và composite có hạn chế về chịu nhiệt và độ bền lâu dài [9]. Các giải pháp vật liệu mới cần được nghiên cứu để đáp ứng yêu cầu đa dạng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Kết cấu lattice là mạng lưới các thanh kết nối với nhau, được thiết kế để tối ưu hóa trọng lượng và khả năng chịu lực. Các mô hình toán học và phương pháp phân tích cơ học được sử dụng để mô phỏng và dự đoán hành vi của kết cấu này dưới tác động của lực uốn. Các vật liệu phổ biến bao gồm kim loại, hợp kim nhẹ, và vật liệu composite. Đặc tính cơ học của vật liệu, như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi, đóng vai trò quan trọng trong việc thiết kế và chế tạo. Công nghệ in 3D và gia công CNC là hai phương pháp chính, cho phép tạo ra các chi tiết có cấu trúc phức tạp mà không cần khuôn mẫu. Các nghiên cứu lý thuyết thường tập trung vào việc tối ưu hóa quy trình chế tạo để đảm bảo độ chính xác và hiệu suất cao.

Mô phỏng nghiên cứu chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice thường được thực hiện bằng các phương pháp như phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis - FEA). Phương pháp này cho phép các nhà nghiên cứu đánh giá khả năng chịu lực, đặc tính uốn, và tối ưu hóa thiết kế của kết cấu lattice trong các điều kiện tải trọng khác nhau.

Mô phỏng chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice bằng phần mềm ANSYS là một quy trình phức tạp nhưng rất hiệu quả để phân tích và tối ưu hóa thiết kế. Sử dụng ANSYS Design Modeler để tạo mô hình chi tiết với kết cấu lattice. Mô hình này cần phản ánh chính xác hình học và các đặc điểm của chi tiết thực tế. Sử dụng ANSYS Meshing để chia lưới mô hình. Quá trình này giúp phân chia mô hình thành các phần tử nhỏ hơn để phân tích chính xác hơn. Nhập các thông số vật liệu như độ bền kéo, độ cứng, và khả năng chịu mỏi. ANSYS hỗ trợ nhiều loại vật liệu, từ kim loại đến composite. Mô phỏng các điều kiện tải trọng thực tế, như lực uốn, lực kéo, hoặc áp suất. Điều kiện biên cũng cần được thiết lập để phản ánh môi trường hoạt động của chi tiết. Sử dụng các module như ANSYS Mechanical để phân tích ứng suất, biến dạng, và khả năng chịu uốn của kết cấu lattice. Tối ưu hóa thiết kế bằng cách điều chỉnh các thông số như độ dày thanh, hình dạng, hoặc cấu trúc mạng lưới.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

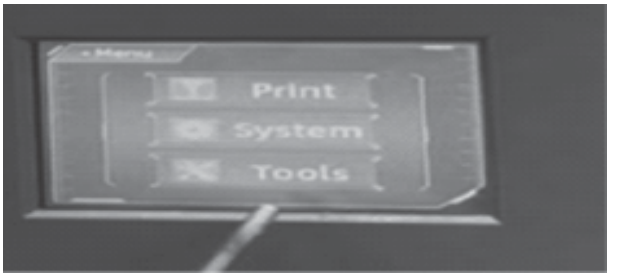
Kết quả mô phỏng cho thấy các vùng ứng suất tập trung cao nhất thường xuất hiện tại các điểm giao nhau của các thanh trong kết cấu lattice. Biến dạng của chi tiết được phân bố đồng đều hơn khi thiết kế tối ưu, giúp cải thiện khả năng chịu uốn. Các thiết kế lattice tối ưu hóa có thể giảm đáng kể trọng lượng mà vẫn đảm bảo độ bền cơ học. Kết quả mô phỏng thường chỉ ra rằng việc thay đổi hình dạng hoặc kích thước của các thanh lattice có thể cải thiện hiệu suất tổng thể. Các kết quả mô phỏng có thể gợi ý những cải tiến trong thiết kế, chẳng hạn như thay đổi vật liệu hoặc cấu trúc để tăng khả

năng chịu lực. Thảo luận cũng có thể bao gồm các hạn chế của mô phỏng, như độ chính xác của mô hình vật liệu hoặc điều kiện biên.

3.1. Chuẩn bị thí nghiệm



Hình 1. Kiểm tra màn UV



Hình 2. Cài đặt các thông số in 3D

Để bắt đầu in 3D với máy Anycubic Photon Mono, người dùng cần bật nguồn bằng cách nhấn nút khởi động. Khi màn hình cảm ứng hiển thị giao diện chính, chọn mục "Tool" để vào phần thiết lập và hiệu chuẩn. Trong mục "Move Z", sử dụng các nút điều khiển để di chuyển trục Z với các bước 0.1mm, 1mm hoặc 10mm, nhằm điều chỉnh bàn in sao cho chính xác, đưa nó về đúng vị trí hoặc thiết lập khoảng cách phù hợp với màn hình. Sau khi đã căn chỉnh xong, nhấn "Z = 0" để đặt lại gốc tọa độ Z, đảm bảo các lớp in sau này sẽ chính xác. Sau khi hoàn tất bước hiệu chỉnh, quay lại màn hình chính và chọn "Print" để chuẩn bị file in. Đồng thời, người dùng cần đổ đầy resin (nhựa lỏng) vào khay in, chắc chắn lượng resin đủ để in mô hình hoàn chỉnh. Kiểm tra xem khay resin đã được lắp đúng và không có vật cản. Tất cả các thông tin về cài đặt và các bước sẽ được hiển thị rõ ràng trên màn hình cảm ứng, bao gồm lựa chọn hệ thống (System), công cụ (Tool) và chế độ in (Print), giúp người dùng dễ dàng thực hiện các thao tác cần thiết trước khi bắt đầu quá trình in 3D.



Hình 3. Giao diện cài đặt thông số in 3D

Máy in 3D resin hoạt động dựa trên việc sử dụng nhựa lỏng cảm quang, được đổ vào khay in. Đầu tiên, người dùng cần điều chỉnh bàn in bằng cách di chuyển trục Z để bàn in tiếp xúc gần với mặt phim FEP trong khay resin, nhằm đảm bảo lớp in đầu tiên bám chặt vào bề mặt. Sau đó, màn hình LCD dưới khay sẽ chiếu các lớp cắt của mô hình, và ánh sáng UV từ đèn LED sẽ xuyên qua các vùng đã được xác định, làm đông cứng nhựa ở những khu vực đó. Khi một lớp hoàn thành, bàn in sẽ từ từ nâng lên, đồng thời lớp nhựa mới sẽ được đưa vào vị trí cũ để tiếp tục in. Quá trình này được lặp lại liên tục, lớp sau sẽ được in lên trên lớp trước cho đến khi mô hình hoàn thiện. Sau khi in xong, vật thể sẽ được nâng lên khỏi khay resin, và cần thực hiện các bước hậu xử lý như rửa bằng cồn và chiếu UV để làm cứng hoàn toàn.

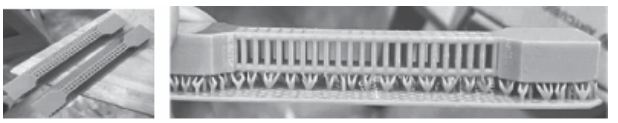
3.2. Sản phẩm

3.2.1. Khái quát

Sản phẩm được thiết kế dưới dạng *lưới cubic*, đây là một kiểu cấu trúc phổ biến trong ☞

kỹ thuật với các ô đều đặn, có tính ứng dụng cao trong công nghiệp, kỹ thuật cơ khí, và các hệ thống kỹ thuật công trình. Được chế tạo từ vật liệu nhựa có tính chịu lực và chống mài mòn, sản phẩm này đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật khắt khe và phù hợp với các ứng dụng đòi hỏi tính chính xác và bền bỉ.

Với kiểu dáng nhỏ gọn và được tối ưu hóa qua việc phân bổ đồng đều các ô lưới, sản phẩm không chỉ nhẹ mà còn có khả năng chịu tải trọng tốt, thích hợp cho cả môi trường áp lực cao hay môi trường yêu cầu tính thông thoáng như hệ thống lọc khí, lọc nước, hoặc làm bề mặt giảm ma sát.



Hình 4. Sản phẩm in 3D

- Cấu hình mạng ô đều (Uniform Grid): Lưới cubic được hình thành từ các ô hình vuông hoặc chữ nhật đều đặn, với các đường liên kết vuông góc tạo thành mạng lưới ba chiều. Điều này đảm bảo sự phân bố đồng đều của tải trọng và tối ưu hóa không gian trống.

- Tỷ lệ rỗng so với đặc (Void-to-Solid Ratio): Thiết kế mạng ô đều cung cấp tỷ lệ rỗng lớn, tạo ra khả năng thông khí, thoát nước hoặc giảm trọng lượng mà không làm suy giảm đáng kể độ bền kết cấu.

- Tính đối xứng: Lưới cubic đảm bảo sự đối xứng hoàn hảo, giúp cải thiện hiệu suất cơ học, dễ dàng dự đoán và kiểm soát hành vi của cấu trúc dưới tác động của lực.

- Phân phối tải trọng: Lưới cubic phân bố lực đồng đều trên toàn bộ bề mặt, giảm thiểu nguy cơ tập trung lực (stress concentration) tại các điểm kết nối. Điều này giúp tăng tuổi thọ sản phẩm và giảm nguy cơ hư hỏng. Khả năng chịu lực nén và lực kéo phụ thuộc vào mật độ ô (cell density) và độ dày của thành ô.

- Độ bền uốn: Với cấu trúc ô đều, lưới cubic có khả năng chịu được lực uốn từ nhiều hướng khác nhau mà vẫn giữ được độ ổn định hình dạng.

- Khả năng chống biến dạng: Cấu trúc ba chiều cho phép chống lại sự biến dạng trong điều kiện áp suất lớn hoặc tải trọng thay đổi liên tục.

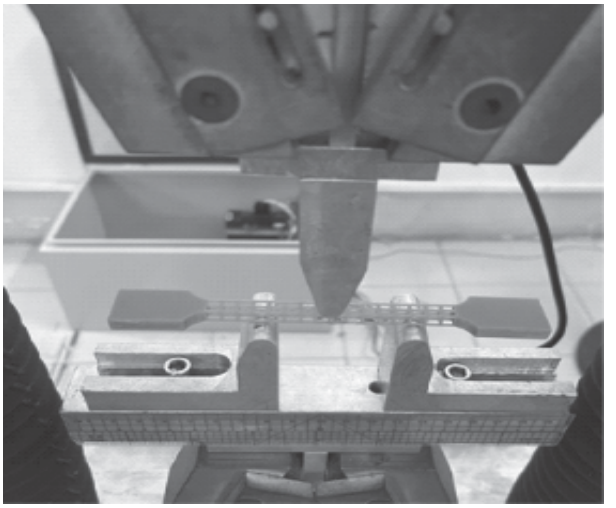
- Ứng dụng trong ngành xây dựng: Lưới cubic được sử dụng làm lưới gia cố trong nền móng hoặc các bề mặt cần khả năng thoát nước tốt, như trong thi công đường bộ hoặc tòa nhà.

- Ứng dụng trong ngành cơ khí: Các mạng ô đều được tích hợp vào thiết kế các bộ phận giảm trọng lượng, như khung máy móc, hoặc làm lớp giảm chấn trong hệ thống cơ động.

- Ứng dụng trong công nghiệp in 3D: Cấu trúc này thường được sử dụng trong in 3D để tạo ra các sản phẩm nhẹ nhưng vẫn đảm bảo độ bền cao.

- Ưu điểm: Tối ưu hóa vật liệu, hiệu năng cao, và đa dạng ứng dụng từ cơ khí, xây dựng, y tế đến chế tạo các sản phẩm công nghiệp phức tạp.

- Hạn chế: Việc chế tạo lưới cubic đòi hỏi công nghệ gia công hiện đại để đảm bảo tính đồng nhất và kích thước chính xác. Ngoài ra, tùy vào vật liệu sử dụng, khả năng chịu nhiệt của lưới có thể bị giới hạn.



Hình 5. Thử uốn mẫu

3.2.2.Thông số kích thước

- Kiểu lưới: Lưới cubic dạng mạng ô đều.
- Chiều dài tổng thể sản phẩm: 150mm.
- Chiều cao sản phẩm: 10mm.
- Khoảng cách giữa hai phần sản phẩm: 88mm.
- Đường kính một cell (ô lưới): 2mm.
- Vật liệu: Nhựa kỹ thuật, có khả năng chống mài mòn, chịu nhiệt độ cao và kháng hóa chất.

3.2.3. Phân tích

a) Ưu điểm cấu trúc và thiết kế:

- Độ bền cao: Thiết kế dạng lưới cubic đảm bảo phân bố đều lực tác động, giảm tải trọng tập trung, giúp sản phẩm có khả năng chịu lực tốt mà không bị biến dạng.

- Khối lượng nhẹ: Với vật liệu nhựa kỹ thuật và cấu trúc lưới, sản phẩm đạt được trọng lượng nhẹ, lý tưởng cho việc vận chuyển và lắp ráp.

- Khả năng thông thoáng tối ưu: Các ô lưới đường kính 2mm hỗ trợ lưu thông khí, nước hoặc chất lỏng, rất hữu ích trong các hệ thống làm mát, lọc hoặc thoát nước.

- Tính đa dụng: Phù hợp với nhiều lĩnh vực công nghiệp như:

+ Hệ thống lọc khí, lọc nước.

+ Khuôn đúc sản phẩm hoặc làm bộ phận giảm ma sát trong cơ khí.

+ Vật liệu trong xây dựng, dùng làm bề mặt giảm lực hoặc hấp thụ nhiệt.

b) Hạn chế cần lưu ý:

- Khả năng chịu nhiệt giới hạn: Trong trường hợp nhiệt độ vượt quá mức chịu đựng của nhựa kỹ thuật, sản phẩm có thể bị hư hỏng hoặc biến dạng.

- Ứng dụng cụ thể: Kiểu thiết kế này không phù hợp với những hệ thống chịu lực cực lớn hoặc môi trường có áp suất vượt quá ngưỡng kỹ thuật.

c) Ứng dụng thực tiễn:

Sản phẩm này có thể được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực:

- Ngành cơ khí chế tạo: Sử dụng làm các bộ phận đệm hoặc giảm rung.

- Hệ thống môi trường: Làm phần tử trong hệ thống lọc nước hoặc khí.

- Ngành xây dựng: Lót bề mặt, tạo lớp giảm ma sát hoặc giảm áp lực nước tại các khe hở.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về chi tiết chịu uốn với kết cấu lattice đã chứng minh tiềm năng mạnh mẽ trong việc tối ưu hóa trọng lượng và độ bền cơ học của sản phẩm, đặc biệt trong các ngành công nghiệp đòi hỏi hiệu quả cao như hàng không, ô tô, và xây dựng. Kết cấu lattice không chỉ giúp giảm vật liệu sử dụng mà còn đảm bảo khả năng chịu lực vượt trội nhờ cấu trúc ô đều và đối xứng. Với việc tích hợp công nghệ hiện đại như in 3D và gia công CNC, quá trình chế tạo đã được tinh gọn và đạt độ chính xác cao, góp phần mở rộng ứng dụng thực tiễn của sản phẩm. ☞

Sản phẩm lưới cubic là minh chứng rõ ràng cho tính linh hoạt, hiệu quả trong thiết kế, và khả năng ứng dụng rộng rãi từ cơ khí đến xây dựng. Tuy nhiên, những hạn chế như khả năng chịu nhiệt giới hạn và yêu cầu công nghệ gia công phức tạp cần được xem xét để đảm bảo tối ưu hóa hiệu suất. Tổng quan, kết cấu lattice và sản phẩm lưới cubic hứa hẹn sẽ tiếp tục trở thành một giải pháp quan trọng trong việc cải thiện hiệu quả vật liệu, giảm chi phí sản xuất, và thúc đẩy sự phát triển của các ngành công nghiệp hiện đại.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Thái Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Trần Xuân Hoàng, Nguyễn Văn Tú, Nguyễn Quang Sáng, Tạ Nguyễn Minh Đức;
- Tác giả liên hệ: Tạ Nguyễn Minh Đức.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất đến Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh vì đã tạo điều kiện tài trợ kinh phí và hỗ trợ tận tình trong suốt quá trình thực hiện nghiên cứu. Những sự đồng hành và giúp đỡ quý báu từ nhà trường đã góp phần rất lớn trong việc hoàn thiện đề tài nghiên cứu khoa học với mã số SV2025-369 này. Sự hỗ trợ không chỉ mang lại nguồn lực mà còn là động lực lớn để nhóm thực hiện nghiên cứu, đóng góp vào sự phát triển khoa học và kỹ thuật. Một lần nữa, nhóm xin chân thành cảm ơn sự ủng hộ và tin tưởng từ Quý nhà trường.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **22/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Lee, D.-W., Khan, K. A., & Abu Al-Rub, R. K. (2017), "*Stiffness and yield strength of architectured foams based on the Schwarz Primitive triply periodic minimal surface*". International Journal of Plasticity, 95, 1-20. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.03.005

[2]. Abueidda, D. W., Elhebeary, M., Shiang, C.-S. (Andrew), Abu Al-Rub, R. K., & Jasiuk, I. M. (2020), "*Compression and buckling of microarchitectured Neovius-lattice*". Extreme Mechanics Letters, 37, 100688. https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100688

[3]. Celestine, A.-D. N., Agrawal, V., & Runnels, B. (2020), "*Experimental and numerical investigation into mechanical degradation of polymers*". Composites Part B: Engineering, 201, 108369. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108369

[4]. Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015), "*Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS*". Materials, 8(9), 5834-5846. https://doi.org/10.3390/ma8095271

[5]. Modrek, M., Viswanath, A., Khan, K. A., Hassan Ali, M. I., & Abu Al-Rub, R. K. (2023), "*Multi-objective topology optimization of passive heat sinks including self-weight based on triply periodic minimal surface lattices*". Case Studies in Thermal Engineering, 42, 102684. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102684

[6]. Maskery, I., Aremu, A. O., Parry, L., Wildman, R. D., Tuck, C. J., & Ashcroft, I. A. (2018), "*Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading*". Materials & Design, 155, 220-232.

[7]. Viswanath, A., Khalil, M., Khan, M. K. A., Al Maskari, F., Cantwell, W. J., & Khan, K. A. (2024), "*A novel design strategy to enhance buckling resistance of thin-walled single-cell lattice structures via topology optimisation*". Virtual and Physical Prototyping, 19(1), e2345390. https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2345390

[8]. Zhu, Y., Pan, J., Polyzos, E., Wang, J., & Pyl, L. (2024), "*Design and numerical analysis of perforated plate lattice structures*". Thin-Walled Structures, 204, 112339. https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112339

[9]. Zhang, Q., et al. (2015), "*Bioinspired engineering of honeycomb structure – using nature to inspire human innovation*". Progress in Materials Science, 74, 332-400. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.05.001

[10]. Zhang, J., & Lu, G. (2023), "*Energy absorption of re-entrant honeycombs in tension and compression*". Engineering Structures, 288, 116237. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116237

THỰC NGHIỆM NHIỆT ĐỘ CỦA LÒNG KHUÔN ÂM VỚI CÁC THÔNG SỐ GIA NHIỆT KHÁC NHAU

EXPERIMENT ON THE TEMPERATURE OF THE NEGATIVE MOLD CORE WITH DIFFERENT HEATING PARAMETERS

Hồ Minh Trí, Dương Văn Linh, Nguyễn Văn Tú, Trần Thanh Lam*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22144215@student.hcmute.edu.vn;
linhdv@hcmute.edu.vn;
tunv@hcmute.edu.vn;
**lamtt@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Trong xã hội hiện đại, sự tiến bộ công nghệ thúc đẩy phát triển vượt bậc trong khoa học và sáng tạo. Nhờ đó, các sản phẩm và thiết bị ngày càng nhỏ gọn, nhẹ, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật cao, thẩm mỹ và giá trị kinh tế. Điều này đặt ra thách thức lớn cho ngành nhựa. Khi xử lý khuôn truyền nhiệt, nếu nhiệt độ tạo hình được duy trì gần với nhiệt độ chuyển pha của nhựa, khả năng điền đầy các chi tiết phức tạp ở quy mô nhỏ sẽ tăng. Nhiệt độ bề mặt khuôn cao giúp quá trình đổ nhựa đơn giản hơn, cải thiện chất lượng bề mặt sản phẩm. Tuy nhiên, nhiệt độ khuôn cao làm chậm quá trình làm nguội, kéo dài chu kỳ ép phun và tăng chi phí. Do đó, việc thiết kế hệ thống làm mát hiệu quả là cần thiết để đáp ứng yêu cầu sản phẩm. Hiện nay, nhiều khuôn ép nhựa sử dụng kênh làm mát thẳng, gây làm mát không đều, dẫn đến sai lệch không mong muốn. Các phương pháp mới, như làm mát qua lớp làm mát, đang được nghiên cứu để đảm bảo làm mát đồng đều, giảm thời gian và lỗi trong ép phun.

Từ khóa: *Nhiệt độ lòng khuôn; Thông số gia nhiệt; Ép phun nhựa; Làm mát khuôn; Chất lượng bề mặt.*

ABSTRACT

In today's society, technological advancements drive significant progress in science and innovation. This leads to the development of compact, lightweight products and devices that meet stringent technical requirements, offer high aesthetics, and maintain economic value. Such demands pose modern challenges in the plastics industry. During heat transfer molding, maintaining the molding temperature close to the phase transition temperature of the plastic resin enhances the ability to fill intricate shapes with small-scale precision. Generally, higher surface temperatures simplify the resin injection process, improving product surface quality in most cases. However, elevated mold temperatures delay the cooling process, extending injection molding cycles and increasing production costs. Therefore, designing an efficient cooling system is crucial to meet specific product and shape requirements. Currently, most injection molds with straight cooling ☞

channels result in uneven cooling, causing temperature variations across mold surfaces and undesirable defects. Emerging methods, such as conformal cooling, aim to achieve uniform cooling, reducing time and errors in injection molding. Motivated by these challenges, our team decided to research and develop the topic: "Design and Fabrication of Conformal Cooling Layers and Thin-Walled Molds". By overcoming experimental parameters, we aim to apply our findings to practical industrial production.

Keywords: *Mold core temperature; Heating parameters; Plastic injection molding; Mold cooling; Surface quality.*

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của ngành công nghiệp sản xuất nhựa, việc kiểm soát và điều chỉnh nhiệt độ trong khuôn ép đóng vai trò then chốt đối với chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất. Quá trình ép nhựa chịu ảnh hưởng mạnh từ sự chênh lệch nhiệt độ giữa các bề mặt khuôn và vật liệu nhựa nóng chảy, làm phát sinh các hiện tượng như co rút, cong vênh, rỗ khí hoặc tạo bavia nếu không được kiểm soát tốt [1]. Do đó, hệ thống giải nhiệt hiệu quả không chỉ giúp duy trì nhiệt độ khuôn ở mức ổn định mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác, độ bóng bề mặt, và thời gian chu kỳ của sản phẩm [2].

Các phương pháp truyền thống như kênh làm mát tròn được gia công bằng khoan thẳng tuy phổ biến nhưng lại tồn tại nhiều hạn chế, đặc biệt là ở các khuôn có hình dạng phức tạp. Kết cấu này thường dẫn đến sự phân bố nhiệt không đồng đều, từ đó gây biến dạng sản phẩm và giảm tuổi thọ khuôn [3]. Nhằm khắc phục những nhược điểm trên, nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung vào phát triển các hệ thống làm mát tối ưu, trong đó nổi bật là giải pháp hệ thống giải nhiệt dạng lớp (layer cooling system) – một hướng tiếp cận mang tính đột phá, đặc biệt phù hợp với khuôn có hình dạng phức tạp hoặc yêu cầu nhiệt độ chính xác cao [4].

Hệ thống giải nhiệt dạng lớp là một cải tiến dựa trên nguyên lý tăng diện tích truyền nhiệt thông qua việc sử dụng các kênh dạng phẳng hoặc các hóc tản nhiệt, kết hợp với các bi thép hoặc bi sắt đóng vai trò như vật trung gian truyền nhiệt. Cấu trúc này không những mở rộng diện tích tiếp xúc giữa chất lỏng làm mát và khuôn mà còn làm tăng khả năng phân bố đồng đều nhiệt độ trong lòng khuôn, từ đó đảm bảo chất lượng sản phẩm ổn định hơn [5]. Thực nghiệm cho thấy rằng, với cùng điều kiện vận hành, khuôn sử dụng hệ thống giải nhiệt layer có thể giảm thời gian làm mát lên đến 20-30% so với hệ thống làm mát truyền thống [6].

Một số nghiên cứu sử dụng công nghệ in 3D kim loại hoặc gia công CNC chính xác để tạo các lớp kênh tản nhiệt phức tạp, từ đó tạo điều kiện cho thiết kế giải nhiệt linh hoạt, phù hợp với từng vùng yêu cầu nhiệt độ riêng biệt trong khuôn [7]. Thêm vào đó, một số nhóm nghiên cứu còn đề xuất phương án sử dụng bi thép có kích thước tương đương độ sâu hóc để hỗ trợ việc truyền nhiệt hiệu quả hơn, đồng thời ngăn ngừa hiện tượng võng hoặc bung vỡ của các lớp kênh khi chịu áp lực cao trong quá trình ép nhựa [8].

Việc cải thiện khả năng kiểm soát nhiệt độ trong khuôn ép nhựa thông qua hệ thống giải nhiệt layer mang lại lợi ích rõ rệt trong

việc nâng cao chất lượng sản phẩm, đồng thời tăng tuổi thọ khuôn và giảm chi phí bảo trì. Tuy nhiên, không thể phủ nhận rằng việc áp dụng hệ thống này còn đối mặt với một số thách thức như chi phí chế tạo cao, yêu cầu độ chính xác gia công cao và khó khăn trong bảo trì hệ thống kênh nhiều lớp [9]. Đặc biệt, khi các bi thép bị ăn mòn hoặc kẹt do cặn bẩn trong chất lỏng làm mát, việc tháo lắp bảo trì gặp nhiều trở ngại và có thể ảnh hưởng tới toàn bộ chu trình sản xuất [8].

Trong các thí nghiệm thực tế, nhóm nghiên cứu đã tiến hành so sánh nhiệt độ phân bố trong khuôn giữa hệ thống giải nhiệt layer và hệ thống kênh tròn truyền thống. Kết quả cho thấy rằng, với cùng một thông số nhiệt đầu vào, hệ thống layer cho ra kết quả nhiệt độ bề mặt khuôn đồng đều hơn, với sai số nhiệt độ giữa các điểm đo giảm đáng kể, chỉ dao động dưới 2°C so với trên 5°C trong hệ thống truyền thống [1], [6]. Điều này chứng minh tính ưu việt của hệ thống layer trong việc kiểm soát chất lượng nhiệt, đặc biệt phù hợp với các sản phẩm đòi hỏi dung sai kích thước chặt chẽ hoặc có hình dạng mỏng, phức tạp [3], [7].

Ngoài ra, một số giải pháp bổ trợ như việc tối ưu hóa hình học của kênh làm mát, áp dụng mô phỏng nhiệt độ qua phần mềm CFD (Computational Fluid Dynamics), hay tích hợp cảm biến nhiệt độ trong khuôn đang được tích cực nghiên cứu nhằm nâng cao hơn nữa hiệu quả của hệ thống giải nhiệt dạng lớp [5], [9]. Những tiến bộ này hướng tới mục tiêu xây dựng một hệ thống khuôn thông minh, có khả năng tự điều chỉnh dòng chảy hoặc nhiệt độ làm mát theo điều kiện thực tế để duy trì trạng thái vận hành tối ưu [8].

Từ những nền tảng lý thuyết và thực nghiệm trên, bài báo này tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của các thông số gia nhiệt đến nhiệt độ thực tế bên trong lòng khuôn. Việc hiểu rõ mối tương quan giữa thông số gia nhiệt và sự phân bố nhiệt trong lòng khuôn không chỉ giúp tối ưu hóa thiết kế hệ thống giải nhiệt mà còn là cơ sở để triển khai các chiến lược kiểm soát nhiệt độ tiên tiến trong sản xuất công nghiệp.

2. QUY TRÌNH GIA CÔNG KHUÔN

Tấm kẹp trước, hay còn gọi là tấm kẹp di động, là một bộ phận quan trọng của khuôn ép nhựa. Được gắn trên máy ép nhựa, tấm này có nhiệm vụ giữ chặt nửa khuôn di động trong suốt quá trình ép. Tấm kẹp trước di chuyển cùng máy ép, tạo ra lực kẹp cần thiết để giữ hai nửa khuôn (di động và cố định) chặt chẽ với nhau khi nhựa nóng chảy được tiêm vào khuôn. Ngoài ra, nó còn là điểm gắn vòng định vị và bạc cuống phun.

• Chức năng chính: Giữ chặt khuôn. Tấm kẹp trước đảm bảo nửa khuôn di động và cố định được giữ chặt trong suốt quá trình ép, ngăn khuôn xê dịch hoặc mở ra khi nhựa nóng chảy được tiêm, từ đó tránh các lỗi trên sản phẩm.

• Phân bố áp lực: Giúp phân phối đều áp lực kẹp lên toàn bộ bề mặt khuôn, đảm bảo sản phẩm nhựa được tạo hình chính xác, đồng đều, tránh hiện tượng sai lệch hoặc biến dạng.

• Dẫn hướng di chuyển: Thường được gắn trên các thanh dẫn hướng, tấm kẹp trước đảm bảo sự di chuyển mượt mà và chính xác của nửa khuôn di động khi máy ép đóng và mở, góp phần duy trì độ ổn định trong sản xuất.

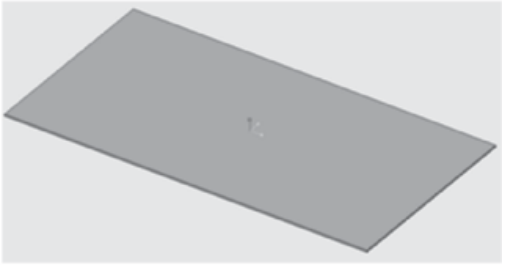
• Vật liệu và thiết kế: Tấm kẹp trước được thiết kế chú trọng đến độ bền và độ chính xác, sử dụng vật liệu có độ bền cao, chịu ☞

được lực lớn và ứng suất nhiệt trong quá trình ép nhựa. Kích thước của tấm được tính toán cẩn thận để phù hợp với cấu trúc tổng thể của khuôn và thông số kỹ thuật của máy ép. Độ dày và diện tích bề mặt của tấm được tối ưu để chịu được lực kẹp cần thiết đồng thời đảm bảo độ bền cấu trúc.

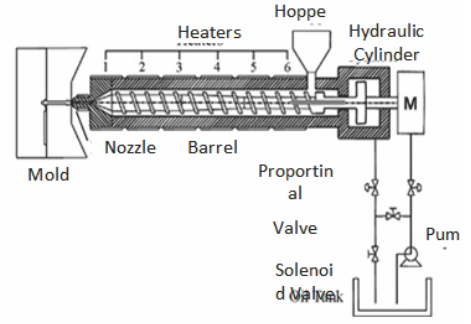
• Vai trò trong quá trình ép nhựa: Tấm kẹp trước đóng vai trò then chốt trong việc tạo ra sản phẩm nhựa chất lượng cao. Khả năng giữ chặt khuôn, phân bố áp lực đồng đều và hỗ trợ di chuyển chính xác ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và tính đồng nhất của sản phẩm. Một tấm kẹp trước được thiết kế tốt giúp giảm thiểu lỗi sản xuất như hiện tượng nhựa tràn hoặc điền đầy không hoàn chỉnh, đồng thời nâng cao hiệu suất của quá trình ép. Việc tích hợp với các bộ phận như vòng định vị và bạc cuống phun đảm bảo căn chỉnh chính xác và dòng chảy vật liệu mượt mà, góp phần tạo ra sản phẩm không lỗi.

Bảng 1. Danh mục phôi

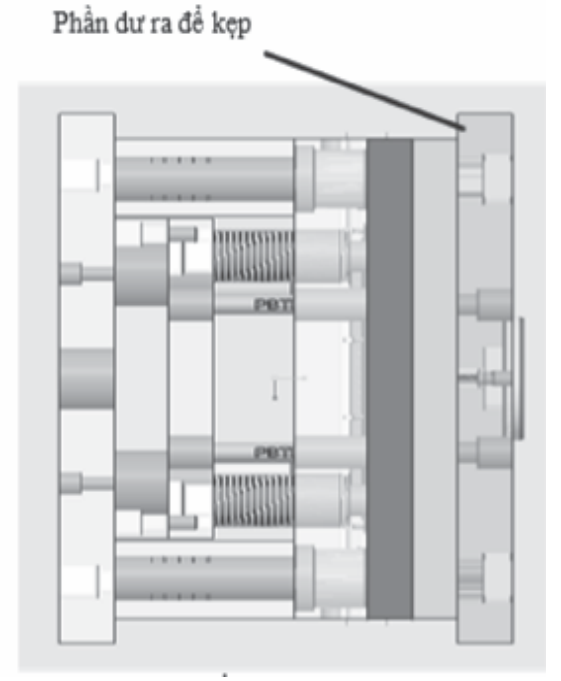
STT	Chi tiết	Kích thước phôi (mm)	Vật liệu	Số lượng	Máy gia công
1	Tấm kẹp trên	430×400×30	Thép C45	1	Máy phay CNC
2	Tấm kẹp dưới	430×400×30	Thép C45	1	
3	Tấm runner	430×390×25	Thép CT3	1	
4	Tấm khuôn âm	430×390×25	Thép CT3	1	
5	Tấm khuôn dương	430×390×40	Thép CT3	1	
6	Gối đỡ	400×63×100	Thép CT3	2	



Hình 1. Sản phẩm thiết kế



Hình 2. Gia nhiệt khuôn bằng dầu nhiệt



Hình 3. Vị trí tấm kẹp trên trên bộ khuôn

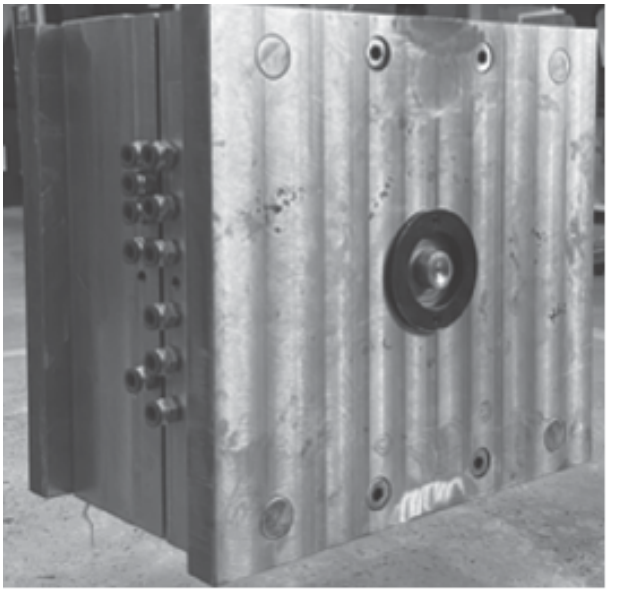
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

3. LẮP GHÉP KHUÔN VÀ THỬ NGHIỆM

Quá trình gia công và lắp ráp bộ khuôn ép nhựa được nhóm nghiên cứu thực hiện cẩn thận nhằm đảm bảo độ chính xác và hiệu suất vận hành của hệ thống. Mỗi tấm khuôn được gia công riêng lẻ bằng máy CNC với độ chính xác cao, sử dụng kỹ thuật phay hóc để tạo các kênh làm mát dạng lớp layer theo thiết kế đã được tối ưu hóa từ các nghiên cứu trước [1]. Sau khi hoàn tất gia công, các tấm khuôn được kiểm tra kỹ lưỡng để đảm bảo không có sai sót về kích thước hoặc khuyết tật bề mặt, điều này đặc biệt quan trọng để tránh các vấn đề như rò rỉ chất làm mát hoặc biến dạng sản phẩm trong quá trình ép phun [2]. Việc lắp ráp các tấm khuôn thành một bộ khuôn hoàn chỉnh được thực hiện với sự hỗ trợ của các dụng cụ căn chỉnh chính xác, đảm bảo các kênh làm mát được kết nối liền mạch và không xảy ra hiện tượng sai lệch vị trí [3].

Sau khi hoàn tất lắp ráp, nhóm tiến hành ép thử sản phẩm để đánh giá hiệu suất của bộ khuôn và hệ thống làm mát. Quá trình ép thử được thực hiện trên máy ép phun công nghiệp với các thông số được điều chỉnh dựa trên đặc tính vật liệu nhựa và yêu cầu kỹ thuật của sản phẩm [4]. Kết quả cho thấy sản phẩm thu được không bị biến dạng, không xuất hiện ba via (flash), và các chi tiết được điền đầy hoàn toàn, đáp ứng đầy đủ các tiêu chuẩn chất lượng [5]. Hình 5 minh họa sản phẩm ép thử với bề mặt mịn, không có khuyết tật, chứng minh rằng quá trình truyền nhiệt từ khuôn ra môi trường xung quanh được kiểm soát hiệu quả nhờ hệ thống làm mát dạng lớp layer [6].

Hệ thống đường nước làm mát, một trong những yếu tố quan trọng nhất của bộ khuôn, được kiểm tra kỹ lưỡng trong giai đoạn thử nghiệm. Các kênh làm mát được thiết kế để tối ưu hóa dòng chảy của chất làm mát, sử dụng bi thép lấp đầy hóc gia công nhằm tăng diện tích tiếp xúc và cải thiện hiệu suất truyền nhiệt [7]. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống làm mát hoạt động ổn định, không có hiện tượng rò rỉ hay tắc nghẽn trong suốt quá trình vận hành [8]. Nhiệt độ bề mặt khuôn được duy trì đồng đều, với độ lệch nhiệt độ giữa các vùng khuôn giảm đáng kể so với các hệ thống làm mát truyền thống, điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về hiệu quả của kênh làm mát dạng lớp layer [9].



Hình 4. Hình ảnh khuôn được lắp ghép hoàn chỉnh

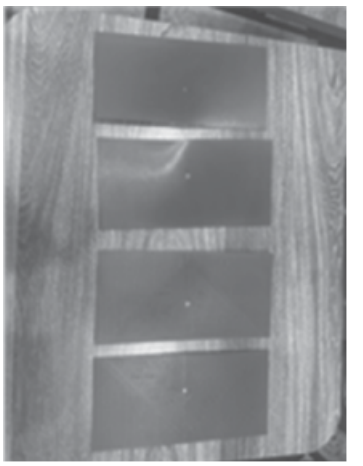
Mặc dù đạt được nhiều kết quả tích cực, quá trình thực nghiệm cũng bộc lộ một số hạn chế của bộ khuôn. Trước hết, kích thước khuôn còn cồng kềnh, dẫn đến khó khăn trong việc vận chuyển và lắp đặt trên các máy ép phun có kích thước giới hạn [8]. Thứ hai, chi phí gia công cao là một trở ngại lớn, chủ yếu do yêu cầu sử dụng máy CNC hiện đại và vật liệu chất lượng cao để đảm bảo độ bền và độ chính xác của khuôn [3]. Những hạn chế này làm giảm tính kinh tế của hệ thống, đặc biệt khi áp dụng vào sản xuất quy mô lớn [5]. Nhóm nghiên cứu ☞

nhận thấy rằng việc tối ưu hóa thiết kế khuôn, chẳng hạn như giảm số lượng tấm khuôn hoặc đơn giản hóa cấu trúc kênh làm mát, có thể giúp giảm chi phí và kích thước tổng thể mà vẫn duy trì hiệu suất làm mát [7].

Trong tương lai, nhóm nghiên cứu dự kiến tập trung vào các hướng cải tiến thiết kế để nâng cao hiệu quả và tính khả thi kinh tế của bộ khuôn. Một trong những giải pháp tiềm năng là ứng dụng các kỹ thuật in 3D (additive manufacturing) để chế tạo các kênh làm mát phức tạp, giúp giảm thời gian gia công và chi phí sản xuất [1]. Ngoài ra, việc sử dụng các vật liệu dẫn nhiệt cao hoặc lớp phủ bề mặt tiên tiến có thể cải thiện hiệu suất truyền nhiệt mà không cần tăng kích thước khuôn [9]. Các nghiên cứu tiếp theo cũng sẽ tập trung vào việc mô phỏng và tối ưu hóa dòng chảy chất làm mát bằng phương pháp CFD để xác định các thông số vận hành tối ưu, từ đó giảm thiểu tiêu thụ năng lượng và thời gian chu kỳ sản xuất [4].

Hình 4 minh họa bộ khuôn được lắp ghép hoàn chỉnh, cho thấy sự chính xác trong thiết kế và gia công của các tấm khuôn. Hình 5 thể hiện sản phẩm ép thử, với các chi tiết rõ ràng và không có khuyết tật, khẳng định hiệu quả của hệ thống làm mát trong việc kiểm soát nhiệt độ khuôn. Những kết quả này không chỉ chứng minh tính khả thi của hệ thống làm mát dạng lớp layer mà còn đặt nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm cải thiện công nghệ khuôn ép nhựa.

Tóm lại, quá trình gia công, lắp ráp, và thử nghiệm bộ khuôn ép nhựa với hệ thống làm mát dạng lớp layer đã mang lại kết quả khả quan, với sản phẩm đạt chất lượng cao và hệ thống làm mát hoạt động ổn định. Tuy nhiên, các hạn chế về kích thước và chi phí gia công đòi hỏi các giải pháp cải tiến trong thiết kế và quy trình sản xuất. Những nỗ lực trong tương lai sẽ tập trung vào việc tối ưu hóa thiết kế khuôn, ứng dụng công nghệ mới, và giảm chi phí để đưa công nghệ này vào ứng dụng thực tiễn một cách hiệu quả hơn.



Hình 5. Sản phẩm thu được khi ép thử

4. KẾT LUẬN

Sau quá trình nghiên cứu, thiết kế và thử nghiệm khuôn ba tấm cùng hệ thống làm mát, nhóm chúng tôi rút ra các kết luận chính như sau:

• Chất lượng sản phẩm: Sản phẩm ép thử đạt yêu cầu, không xuất hiện biến dạng bề mặt, không có ba via, và được điền đầy hoàn toàn, đảm bảo tính chính xác và thẩm mỹ theo thiết kế ban đầu.

• Hiệu suất khuôn: Bộ khuôn ba tấm hoạt động ổn định, tấm kẹp trước giữ chặt khuôn hiệu quả, phân bố áp lực đều, hỗ trợ di chuyển chính xác, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm.

• Hệ thống làm mát: Đường nước làm mát được lắp ráp hoàn chỉnh, vận hành trơn tru, không rò rỉ, đảm bảo khả năng làm mát đồng đều, giúp rút ngắn thời gian chu kỳ ép.

• Hạn chế: Khuôn có kích thước lớn, cồng kềnh, dẫn đến chi phí gia công cao hơn so với các loại khuôn thông thường, gây khó khăn trong việc tối ưu chi phí sản xuất.

• Hướng phát triển: Nhóm sẽ tiếp tục nghiên cứu để thu gọn kích thước khuôn, cải tiến thiết kế hệ thống làm mát, và tìm giải pháp giảm chi phí gia công, nhằm nâng cao tính kinh tế và ứng dụng thực tiễn trong sản xuất công nghiệp.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Võ Kim Hằng;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Hồ Minh Trí, Dương Văn Linh, Nguyễn Văn Tú, Trần Thanh Lam.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-340.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Kuo, C. C., Xu, J.-Y., Zhu, Y.-J., & Lee, C.-H. (2022), "*Effects of different mold materials and coolant media on the cooling performance of epoxy-based injection molds*". Polymers, 14(2), 280. https://doi.org/10.3390/polym14020280

[2]. Li, X. P., Zhao, G. Q., & Guan, Y. J. (2011), "*Characteristic of rapid heating cycle moulding and warpage analysis of products*". Plastics, Rubber and Composites, 40, 425-432. https://doi.org/10.1179/1743289810Y.0000000017

[3]. Wang, G., Hui, Y., Zhang, L., & Zhao, G. (2018), "*Research on temperature and pressure responses in the rapid mold heating and cooling method based on annular cooling channels and electric heating*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 116, 1192-1203. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.102

[4]. Shen, J. L., Zhang, Y. C., & Xing, T. T. (2018), "*The study on the measurement accuracy of non-steady state temperature field under different emissivity using infrared thermal image*". Infrared Physics & Technology, 94, 207-213. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.08.010

[5]. Kuo, C. C., & Zhu, Y.-J. (2022), "*Characterization of epoxy-based rapid mold with profiled conformal cooling channel*". Polymers, 14(15), 3017. https://doi.org/10.3390/polym14153017

[6]. Li, J., Li, T., Xu, F., & Jiang, S. (2019), "*A quantitative evaluation of the appearance quality of weld lines in RHCM parts*". Emergent Materials Research, 8, 253-257. https://doi.org/10.1680/jemmr.18.00036

[7]. Huzaim, N. H., Rahim, S. Z., Musa, L., Abdellah, A. E.-H., Abdullah, M. M. A. B., Rennie, A., Rahman, R., Garus, S., Błoch, K., & Sandu, A. V., et al. (2022), "*Potential of rapid tooling in rapid heat cycle molding: A review*". Materials, 15(11), 3725. https://doi.org/10.3390/ma15113725

[8]. Crema, L., Sorgato, M., & Lucchetta, G. (2017), "*Thermal optimization of deterministic porous mold inserts for rapid heat cycle molding*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 109, 462-469. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.031

[9]. Wang, G., Zhao, G., & Wang, X. (2013), "*Effects of cavity surface temperature on reinforced plastic part surface appearance in rapid heat cycle moulding*". Materials & Design, 44, 509-520. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.030

THỰC NGHIỆM ĐO PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ CỦA LÒNG KHUÔN PHUN ÉP NHỰA

EXPERIMENTAL STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN INJECTION MOLD CAVITIES

Lê Đức Thắng, Trần Thanh Thưởng, Trần Thanh Lam, Nguyễn Quang Sáng*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 22144191@student.hcmute.edu.vn; thuongtt@hcmute.edu.vn; lamtt@hcmute.edu.vn; *sangnq@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực ép phun, sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt, độ chính xác hình học và độ bền cơ học của sản phẩm. Đặc biệt đối với khuôn hình vuông, việc duy trì nhiệt độ ổn định và phân bố đều trong toàn bộ khoang khuôn là một thách thức kỹ thuật quan trọng. Nghiên cứu này tập trung vào thực nghiệm đo phân bố nhiệt độ của lòng khuôn phun ép nhựa bằng cách sử dụng hệ thống cảm biến nhiệt độ đặt tại nhiều vị trí khác nhau trong khuôn. Dữ liệu thu thập được giúp đánh giá chính xác mức độ đồng đều nhiệt và xác định các khu vực có nguy cơ gây ra sai lệch chất lượng sản phẩm. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để so sánh, hiệu chỉnh các phương pháp làm nóng khuôn hiện tại cũng như đề xuất hướng điều khiển nhiệt độ hiệu quả hơn, đặc biệt khi sử dụng công nghệ gia nhiệt bằng khí nóng. Nghiên cứu hướng đến mục tiêu nâng cao tính đồng nhất của sản phẩm, giúp giảm thiểu biến dạng nhiệt, giảm tỷ lệ lỗi sản phẩm và tối ưu hóa hiệu suất sản xuất.

Từ khóa: *Nhiệt độ khuôn; Gia nhiệt bằng khí; Chụp khí; Khuôn phun ép nhựa.*

ABSTRACT

In injection molding, the temperature distribution within the mold cavity directly affects the surface quality, geometric accuracy, and mechanical strength of the product. This is especially critical for square-shaped molds, where maintaining stable and evenly distributed temperature throughout the cavity presents a significant technical challenge. This study focuses on experimentally measuring the temperature distribution inside the injection mold cavity using a system of temperature sensors placed at various locations within the mold. The collected data enables accurate assessment of thermal uniformity and identification of potential areas that may cause product quality deviations. The research results serve as a basis for comparing and fine-tuning existing mold heating methods, as well as proposing more efficient temperature control strategies – particularly with the application of hot gas heating technology. The study aims to enhance product uniformity, minimize thermal deformation, reduce defect rates, and optimize production efficiency.

Keywords: *Mold temperature; Hot gas heating; Gas cover; Injection mold.*

1. TỔNG QUAN

Ép phun là một trong những phương pháp gia công nhựa phổ biến nhất trong ngành công nghiệp sản xuất hiện nay, nhờ vào khả năng sản xuất hàng loạt với chi phí thấp, thời gian chu kỳ ngắn và tính linh hoạt trong việc tạo hình các sản phẩm phức tạp [1]. Phương pháp này được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, từ sản xuất linh kiện ô tô, thiết bị điện tử, đến các sản phẩm tiêu dùng hàng ngày. Tuy nhiên, chất lượng của sản phẩm ép phun phụ thuộc đáng kể vào khả năng kiểm soát các thông số kỹ thuật trong quá trình sản xuất, trong đó nhiệt độ của khuôn đóng vai trò đặc biệt quan trọng [2]. Đặc biệt, giai đoạn làm nóng khuôn trước khi phun nhựa có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác hình học, tính chất cơ học và chất lượng bề mặt của sản phẩm cuối cùng [3]. Việc đảm bảo phân bố nhiệt độ đồng đều trong lòng khuôn không chỉ giúp giảm thiểu các khuyết tật như cong vênh, co ngót không đồng đều hay ứng suất dư, mà còn nâng cao hiệu quả sản xuất và giảm tỷ lệ sản phẩm lỗi [4].

(*) Vai trò của kiểm soát nhiệt độ trong ép phun:

Trong quá trình ép phun, khuôn cần được làm nóng đến một nhiệt độ nhất định trước khi nhựa nóng chảy được phun vào để đảm bảo dòng chảy nhựa được duy trì ổn định và lấp đầy toàn bộ lòng khuôn [5]. Nhiệt độ khuôn không chỉ ảnh hưởng đến tốc độ làm nguội của nhựa mà còn quyết định đến cấu trúc vi mô và tính chất vật lý của sản phẩm [6]. Nếu nhiệt độ khuôn không được kiểm soát tốt, hiện tượng nóng lạnh không đều có thể xảy ra, dẫn đến các khuyết tật như đường hàn kém, bề mặt không đồng nhất hoặc biến dạng sản phẩm [7]. Do đó, việc tối ưu hóa quá trình làm nóng khuôn, đặc biệt bằng phương pháp sử dụng khí nóng, là một hướng nghiên cứu quan trọng nhằm cải thiện chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất [8].

Phương pháp gia nhiệt bằng khí nóng có nhiều ưu điểm, bao gồm khả năng truyền nhiệt nhanh, chi phí vận hành thấp và khả năng điều chỉnh linh hoạt nhiệt độ đầu vào [9]. Tuy nhiên, để đạt được phân bố nhiệt độ đồng đều trên bề mặt khuôn, cần giải quyết các thách thức liên quan đến thiết kế hệ thống dẫn khí, sự phân bố dòng khí nóng, và khả năng giảm thiểu tổn thất nhiệt trong quá trình truyền nhiệt [10]. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng việc tối ưu hóa các thông số như lưu lượng khí, áp suất, và cấu trúc của hệ thống dẫn khí có thể cải thiện đáng kể hiệu suất truyền nhiệt và độ đồng đều của nhiệt độ khuôn [3, 8].

(*) Tầm quan trọng của phân bố nhiệt độ đồng đều:

Phân bố nhiệt độ đồng đều trong lòng khuôn là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng sản phẩm ép phun. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng của khuôn có thể gây ra hiện tượng co ngót không đồng đều, dẫn đến biến dạng hoặc nứt gãy sản phẩm [4]. Ngoài ra, các vùng có nhiệt độ quá cao có thể làm tăng thời gian làm nguội, kéo dài chu kỳ sản xuất và làm giảm năng suất, trong khi các vùng có nhiệt độ quá thấp có thể gây ra hiện tượng dòng nhựa bị đông kết sớm, dẫn đến sản phẩm không lấp đầy hoàn toàn [5]. Để giải quyết vấn đề này, các nghiên cứu đã tập trung vào việc phát triển các hệ thống gia nhiệt tiên tiến, sử dụng cảm biến nhiệt độ chính xác và hệ thống điều khiển phản hồi nhanh để duy trì nhiệt độ khuôn ở mức mong muốn [6].

Cảm biến nhiệt độ đóng vai trò quan trọng trong việc giám sát và điều chỉnh nhiệt ☞

độ khuôn trong thời gian thực. Các cảm biến hiện đại, chẳng hạn như cặp nhiệt điện hoặc cảm biến hồng ngoại, cho phép đo lường chính xác sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí khác nhau trên bề mặt khuôn [7]. Dữ liệu từ các cảm biến này được sử dụng để điều chỉnh lưu lượng khí nóng, áp suất hoặc thời gian gia nhiệt, từ đó đảm bảo sự ổn định và đồng đều của nhiệt độ [9]. Ngoài ra, việc tích hợp các hệ thống điều khiển tự động, chẳng hạn như bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative), đã được chứng minh là hiệu quả trong việc duy trì các điều kiện nhiệt độ tối ưu trong suốt chu kỳ ép phun [10].

(*) Thiết kế hệ thống dẫn khí và thoát khí:

Hệ thống dẫn khí và thoát khí là một thành phần quan trọng trong quá trình gia nhiệt khuôn bằng khí nóng. Thiết kế của hệ thống này ảnh hưởng trực tiếp đến cách khí nóng tiếp xúc với bề mặt khuôn và mức độ phân bố nhiệt độ [2]. Một hệ thống dẫn khí được thiết kế tốt cần đảm bảo rằng dòng khí nóng được phân phối đều khắp lòng khuôn, đồng thời giảm thiểu sự mất mát nhiệt ra môi trường xung quanh [3]. Các thông số thiết kế quan trọng bao gồm số lượng và vị trí của các lỗ phun khí, hình dạng của nắp khí, và khoảng cách giữa nắp khí và bề mặt khuôn [8].

Nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng nắp khí có cấu trúc hình học phù hợp, chẳng hạn như hình vuông hoặc hình tròn, có thể cải thiện sự phân bố dòng khí và tăng cường hiệu quả truyền nhiệt [4]. Ngoài ra, việc tối ưu hóa số lượng và đường kính của các lỗ thoát khí giúp kiểm soát áp suất và tốc độ dòng khí, từ đó giảm thiểu hiện tượng rối loạn dòng chảy và đảm bảo khí nóng tiếp xúc đều với bề mặt khuôn [9]. Một số nghiên cứu cũng đề xuất sử dụng các vật liệu cách nhiệt hoặc lớp phủ đặc biệt cho hệ thống dẫn khí để giảm tổn thất nhiệt, từ đó nâng cao hiệu suất năng lượng của quá trình gia nhiệt [10].

(*) Lựa chọn vật liệu khuôn:

Vật liệu khuôn cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu suất nhiệt của quá trình ép phun. Vật liệu khuôn cần có khả năng chịu nhiệt tốt, truyền nhiệt hiệu quả và độ bền cơ học cao để đáp ứng các điều kiện khắc nghiệt trong quá trình gia nhiệt và làm nguội liên tục [5]. Các loại thép hợp kim, chẳng hạn như thép P20 hoặc thép không gỉ, thường được sử dụng do tính chất truyền nhiệt tốt và khả năng chống ăn mòn [6]. Ngoài ra, việc sử dụng các lớp phủ bề mặt, chẳng hạn như lớp phủ nitrua hoặc lớp phủ gốm, có thể cải thiện khả năng chịu nhiệt và giảm ma sát giữa nhựa và khuôn, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm [7].

Một số nghiên cứu gần đây đã khám phá việc sử dụng các vật liệu composite hoặc hợp kim tiên tiến để chế tạo khuôn, nhằm cải thiện khả năng đáp ứng nhiệt và giảm trọng lượng khuôn [8]. Những vật liệu này không chỉ giúp tăng cường hiệu suất truyền nhiệt mà còn kéo dài tuổi thọ của khuôn trong các ứng dụng sản xuất hàng loạt [9]. Tuy nhiên, chi phí cao của các vật liệu tiên tiến này vẫn là một thách thức, đòi hỏi các nhà sản xuất phải cân nhắc giữa hiệu quả kỹ thuật và chi phí kinh tế [10].

(*) Thách thức và hướng nghiên cứu tương lai:

Mặc dù đã có nhiều tiến bộ trong việc kiểm soát nhiệt độ khuôn trong quá trình ép phun, vẫn còn nhiều thách thức cần được giải quyết. Một trong những thách thức lớn nhất là làm thế nào để đạt được phân bố nhiệt độ đồng đều trên các khuôn có hình dạng phức tạp, nơi

mà dòng khí nóng khó tiếp cận đều đến mọi vùng của lòng khuôn [3]. Ngoài ra, việc tối ưu hóa đồng thời các thông số như lưu lượng khí, áp suất, và thời gian gia nhiệt đòi hỏi các mô hình mô phỏng nhiệt tiên tiến và các thuật toán điều khiển thông minh [6].

Trong tương lai, việc tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy vào các hệ thống điều khiển nhiệt độ khuôn có thể mang lại những bước đột phá, cho phép dự đoán và điều chỉnh các thông số gia nhiệt trong thời gian thực [7]. Đồng thời, các nghiên cứu về thiết kế hệ thống gia nhiệt tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường cũng cần được đẩy mạnh để đáp ứng các yêu cầu về phát triển bền vững [9]. Các giải pháp như sử dụng năng lượng tái tạo để cung cấp nhiệt hoặc tái sử dụng nhiệt thải từ quá trình sản xuất có thể là những hướng đi tiềm năng [10].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác hình học và chất lượng bề mặt sản phẩm nhựa. Các kỹ thuật ép phun hiện đại cần được cải tiến, đặc biệt ở khâu kiểm soát nhiệt độ khuôn Nhiệt độ khuôn hợp lý giúp cải thiện khả năng điền đầy nhựa, tăng độ bóng bề mặt và giảm khuyết tật sản phẩm mà không làm tăng đáng kể thời gian chu kỳ. Quản lý nhiệt độ là một chiến lược hữu ích nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm và cải thiện hiệu suất sản xuất. Nhiều nghiên cứu đã thực hiện về các kỹ thuật kiểm soát nhiệt độ khuôn nhằm tăng nhiệt độ khoang khuôn nhưng vẫn duy trì thời gian chu kỳ ngắn. Các kỹ thuật như sưởi ấm bằng tia hồng ngoại, lửa, laser, cảm ứng và khí nóng được đề xuất để nâng cao hiệu quả và giảm tiêu thụ năng lượng. Sưởi ấm bằng tia hồng ngoại tăng độ bền sản phẩm, trong khi sưởi ấm bằng laser nhanh chóng nhưng chỉ phù hợp cho các sản phẩm nhỏ. Sưởi ấm cảm ứng nhanh chóng nhưng gặp khó khăn về phân phối nhiệt độ và thiết kế cuộn dây. Nghiên cứu này tập trung tối ưu hóa sự thay đổi nhiệt độ trong quá trình làm nóng khuôn bằng khí nóng, đặc biệt là với các cấu trúc cạnh có hình dạng phức tạp nhằm phục vụ cho các ứng dụng ép phun đòi hỏi chất lượng cao.

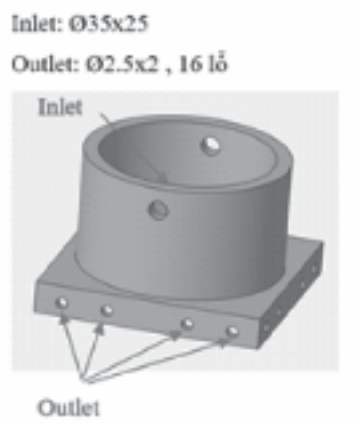
3. MÔ PHỎNG

Trong các quy trình sản xuất công nghiệp, việc kiểm soát nhiệt độ và phân bố nhiệt trên các bộ phận gia công đóng vai trò quan trọng để đảm bảo chất lượng sản phẩm. Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá tác động của thiết kế nắp khí đến phân bố nhiệt độ trên tấm chèn trong quá trình gia nhiệt sử dụng khí nóng. Các thiết kế nắp khí được trình bày chi tiết trong Hình 1 và Hình 2, trong khi kết quả phân bố nhiệt độ trên tấm chèn được quan sát và phân tích qua Hình 3. Các thí nghiệm được tiến hành với tấm chèn có kích thước 50 x 50 mm và độ dày 2 mm, sử dụng các loại nắp khí có độ dày tường 2 mm. Một số thông số thiết kế của nắp khí, bao gồm khoảng cách tiêm, thể tích khí, chiều cao nắp và số lượng lỗ thoát khí, đã được điều chỉnh để nghiên cứu ảnh hưởng của chúng đến hiệu suất gia nhiệt. Các thí nghiệm được thực hiện với khí đầu vào ở nhiệt độ 650°C và thời gian gia nhiệt kéo dài 10 giây.

***Thiết kế Nắp khí:** Hai thiết kế nắp khí chính được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm nắp khí hình vuông và nắp khí hình tròn, được mô tả chi tiết trong Hình 3.1 và Hình 3.2.

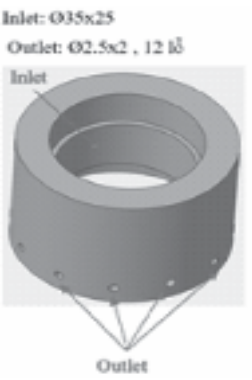
• Hình 3.1 – Thiết kế nắp chụp khí hình vuông: Nắp khí hình vuông được thiết kế với các cạnh phẳng và các lỗ thoát khí phân bố đều trên bề mặt. Thiết kế này nhằm đảm bảo dòng ☞

khí nóng được phân phối đồng đều đến tấm chèn, giảm thiểu hiện tượng tập trung nhiệt tại một số vùng nhất định. Các thông số như số lượng lỗ, đường kính lỗ và khoảng cách giữa các lỗ được điều chỉnh để tối ưu hóa dòng chảy khí và hiệu suất truyền nhiệt.



Hình 3.1. Thiết kế nắp chụp khí hình vuông

• Hình 3.2 – Thiết kế nắp chụp khí hình tròn: Nắp khí hình tròn có dạng đối xứng trục, với các lỗ thoát khí được bố trí theo hình xoáy hoặc đồng tâm, tùy thuộc vào mục đích thí nghiệm. Thiết kế này được kỳ vọng sẽ tạo ra dòng khí xoáy, giúp cải thiện sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt tấm chèn, đặc biệt ở các vùng trung tâm. Tương tự như nắp hình vuông, các thông số thiết kế của nắp hình tròn cũng được thay đổi để đánh giá tác động đến hiệu quả gia nhiệt.

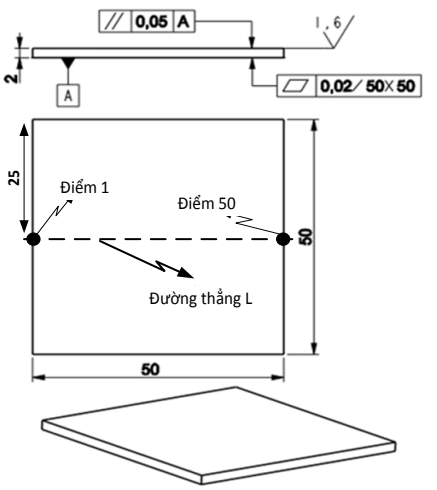


Hình 3.2. Thiết kế nắp chụp khí hình tròn

Cả hai thiết kế nắp khí đều có độ dày tường 2 mm, đảm bảo độ bền cơ học và khả năng chịu nhiệt trong điều kiện nhiệt độ cao. Sự khác biệt giữa hai thiết kế nằm ở hình dạng tổng thể và cách bố trí các lỗ thoát khí, từ đó ảnh hưởng đến cách khí nóng tương tác với tấm chèn.

***Thiết kế Tấm chèn:** Tấm chèn được sử dụng trong thí nghiệm có kích thước 50 x 50 mm và độ dày 2 mm, được mô tả chi tiết trong Hình 3.3. Tấm chèn được chế tạo từ vật liệu có khả năng chịu nhiệt tốt, phù hợp với điều kiện gia nhiệt ở nhiệt độ cao. Bề mặt tấm chèn được gia công phẳng để đảm bảo tiếp xúc tối ưu với dòng khí nóng từ nắp khí. Thiết kế này cho phép tấm chèn được gắn trực tiếp lên khuôn âm trong quá trình gia nhiệt, như được minh họa trong Hình 4.1.

• Hình 3.3 – Thiết kế tấm chèn: Tấm chèn có dạng hình vuông với các cạnh được gia công chính xác để đảm bảo tính đồng nhất về mặt hình học. Kích thước nhỏ gọn và độ dày mỏng của tấm chèn giúp giảm thời gian gia nhiệt, đồng thời cho phép quan sát rõ ràng sự thay đổi nhiệt độ trên toàn bộ bề mặt.



Hình 3.3. Thiết kế tấm chèn

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

4. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

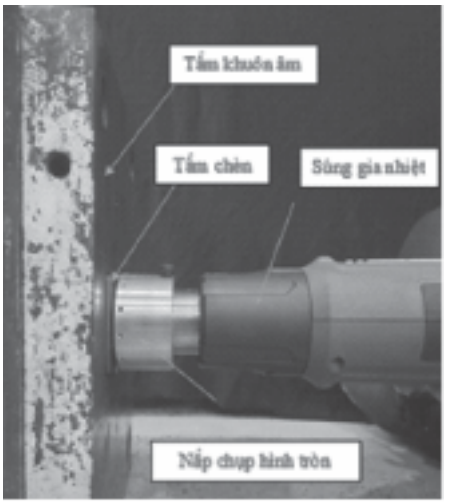
Để nghiên cứu phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn, một mô hình mô phỏng chi tiết đã được xây dựng. Bằng cách thêm một yếu tố cách nhiệt để bao quanh phần làm nóng, mô hình được đơn giản hóa và tập trung vào hai phần chính: tấm chèn và phần khí nóng. Hình 4.1 là gia nhiệt khí nóng cho tấm chèn lắp trên khuôn âm.

Với nhiệt độ môi trường là 25°C và hệ số truyền nhiệt là 10 W/m²K, tất cả các bề mặt bên ngoài của tấm khuôn được cấu hình cho đối lưu tự do vào không khí như là phương thức truyền nhiệt. Để cải thiện hiệu quả làm nóng, một tấm chèn cũng được tích hợp vào bộ thiết lập thí nghiệm gần trung tâm khoang. Mô phỏng sử dụng khoảng nhiệt độ từ 200°C đến 650°C cho đầu vào khí.

Quá trình gia nhiệt được thực hiện bằng cách sử dụng khí nóng ở nhiệt độ 650°C, được phun qua nắp khí và tiếp xúc trực tiếp với tấm chèn. Thời gian gia nhiệt được cố định ở 10 giây để đảm bảo tính nhất quán giữa các thí nghiệm. Tấm chèn được gắn trên khuôn âm, như minh họa trong Hình 4.1, để mô phỏng điều kiện thực tế trong sản xuất.

• Hình 4.1 – Gia nhiệt cho tấm chèn gắn trên khuôn âm: Hình ảnh này cho thấy cách tấm chèn được cố định trên khuôn âm, với nắp khí được đặt phía trên để phun khí nóng. Thiết kế khuôn âm đảm bảo rằng tấm chèn được giữ cố định trong suốt quá trình gia nhiệt, đồng thời cho phép dòng khí nóng tiếp xúc đều với bề mặt tấm. Hệ thống cảm biến nhiệt độ được bố trí để ghi lại sự phân bố nhiệt độ trên tấm chèn trong thời gian thực.

Kết quả phân bố nhiệt độ trên tấm chèn được quan sát và phân tích thông qua Hình 3. Hình ảnh này cung cấp thông tin trực quan về sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt tấm chèn, với các vùng màu biểu thị các mức nhiệt độ khác nhau. Các yếu tố như khoảng cách tiêm (khoảng cách giữa nắp khí và tấm chèn), thể tích khí, chiều cao của nắp khí và số lượng lỗ thoát khí đã được điều chỉnh trong các thí nghiệm để xác định tác động của chúng đến sự đồng đều của phân bố nhiệt độ.

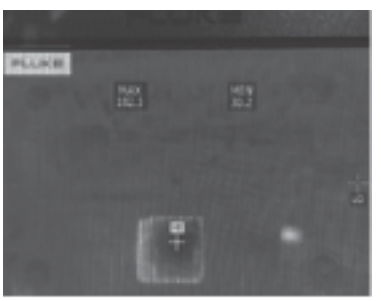


Hình 4.1. Gia nhiệt cho tấm chèn gắn trên khuôn âm

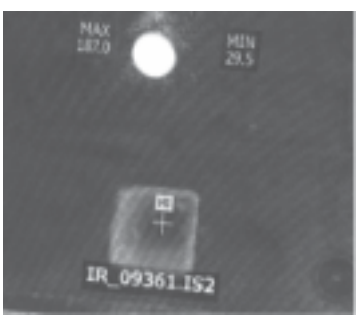
5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình thực nghiệm được sử dụng để đánh giá bước làm nóng với nhiệt độ khí nóng đầu vào đặt ở 650°C và thời gian làm nóng là 10 giây. Để tìm hình dạng tốt nhất cho quá trình làm nóng, nhiều loại nắp khí khác nhau đã được thử nghiệm. Kết quả cho thấy nhiệt độ tối đa đạt được tại khoảng cách tiêm ngắn hơn, cải thiện khả năng hấp thụ nhiệt của tấm chèn. Mặt khác, các khoảng cách tiêm dài hơn cải thiện phân bố nhiệt độ vì khí nóng tăng tốc độ dòng khí khi nó đi qua nắp trước khi ra ngoài. Những phát hiện này cho thấy khoảng cách tiêm ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ và phân bố nhiệt trên tấm chèn. ☞

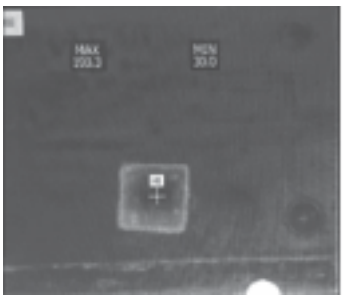
Từ các trường hợp thực nghiệm trình bày ở Bảng 1. Kết quả cho thấy rằng, yếu tố khoảng cách giữa đầu phun khí và bề mặt gia nhiệt được đặc trưng thông qua chiều cao khối khí, ảnh hưởng rõ rệt đến hiệu suất truyền nhiệt. Cụ thể, khi chiều cao khối khí giảm từ 15 mm xuống 5 mm, nhiệt độ cực đại đo được tại bề mặt tấm chèn có xu hướng tăng dần, lần lượt đạt 182°C, 187°C và 193°C. Điều này cho thấy rằng việc giảm khoảng cách phun khí giúp khí nóng tiếp xúc gần hơn bề mặt gia nhiệt, qua đó làm tăng hiệu quả truyền nhiệt nhờ rút ngắn quãng đường tỏa nhiệt và giảm thất thoát nhiệt ra môi trường với điều kiện số lỗ thoát khí phải ít. Tuy nhiên, khi khoảng cách phun khí tăng (chiều cao khối khí lớn hơn), mặc dù nhiệt độ cực đại có phần giảm, nhưng quan sát thực nghiệm đo đạc cho thấy sự phân bố nhiệt trên bề mặt tấm chèn trở nên đồng đều hơn. Điều này được giải thích là do dòng khí nóng có xu hướng trải rộng và tăng tốc khi đi qua nắp chụp khí, tạo ra hiệu ứng khuếch tán nhiệt độ tốt hơn trên toàn bộ bề mặt tấm gia nhiệt.



Hình 5.1. Chiều cao khối khí 15 mm



Hình 5.2. Chiều cao khối khí 10 mm



Hình 5.3. Chiều cao khối khí 5 mm

Từ những phân tích trên, có thể nhận định rằng chiều cao khối khí (hay khoảng cách phun) đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển quá trình gia nhiệt bằng khí, là một tham số then chốt ảnh hưởng đến cả nhiệt độ cực đại và tính đồng đều của quá trình gia nhiệt. Khoảng cách phun ngắn giúp đạt được nhiệt độ cao nhanh chóng tại bề mặt gia nhiệt nhưng có thể dẫn đến phân bố nhiệt độ không đều, trong khi khoảng cách phun dài hơn cải thiện sự đồng đều nhiệt độ nhưng nhiệt độ cực đại giảm. Số lỗ thoát khi cũng đóng vai trò quan trọng giúp nhiệt độ được giữ ổn định trong khi gia nhiệt bằng khí nóng. Trong các ứng dụng yêu cầu đạt nhiệt độ cao nhanh chóng (như gia nhiệt nhanh trước ép phun), chiều cao nhỏ sẽ phù hợp hơn. Ngược lại, với các ứng dụng yêu cầu nhiệt phân bố đều thì chiều cao lớn sẽ là lựa chọn tối ưu.

Bảng 1. Bảng thông số kết quả của quá trình thực nghiệm đo đạc

	Chiều cao khối khí (mm)	**Lỗ thoát khí**	**Nhiệt độ cao nhất (°C)**	**Thời gian (giây)**
Vuông	15mm	16 lỗ	182°C	10 giây
	10mm	16 lỗ	187°C	10 giây
	5mm	16 lỗ	193°C	10 giây

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

6. KẾT LUẬN

Để đánh giá phân bố nhiệt độ đạt được trong quá trình làm nóng bằng việc sử dụng các nắp khí cũng như tiềm năng của nó trong việc cải thiện chiều dài dòng chảy nóng chảy của các sản phẩm từ ép phun, nghiên cứu này đã tiến hành các tính toán và thí nghiệm độc lập. Một loạt các loại nắp khí đã được đánh giá với các kích thước cố định: đường kính lỗ đầu vào là 35 mm, đường kính lỗ ra cố định là 2,5 mm và có 16 lỗ ra khí. Nhiệt độ đầu vào 650°C và thời gian phun khí là 10 giây. Thông qua phân tích các trường hợp chiều cao khối khí khác nhau (5mm, 10mm, 15mm), cho thấy khoảng cách phun ngắn hơn giúp tăng đáng kể nhiệt độ đạt được trên bề mặt tấm chèn. Cụ thể, chiều cao khối khí 5 mm cho kết quả nhiệt độ cao nhất là 193°C, cao hơn 11°C so với trường hợp 15mm. Mặc dù khoảng cách phun ngắn cho hiệu suất truyền nhiệt cao hơn, các quan sát cũng chỉ ra rằng khoảng cách lớn hơn giúp cải thiện sự phân bố nhiệt đồng đều trên bề mặt sau khi gia nhiệt. Do đó, tùy thuộc vào mục tiêu ứng dụng (tối đa hóa nhiệt độ hay đảm bảo tính đồng đều nhiệt) nên chiều cao khối khí cần được lựa chọn phù hợp. Những kết quả thực nghiệm này cho thấy hiệu quả của thiết kế nắp chụp khí trong việc tối ưu hóa quá trình làm nóng trong ép phun và cải thiện sự phân bố nhiệt độ đồng đều và hiệu quả hơn. Việc thu thập dữ liệu thực nghiệm là cơ sở hữu ích cho việc thiết kế và điều chỉnh hệ thống gia nhiệt bằng khí nóng trong các ứng dụng công nghiệp đảm bảo tính chính xác cao về kiểm soát nhiệt độ.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Võ Kim Hằng;
- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Lê Đức Thắng, Trần Thanh Thưởng, Trần Thanh Lam, Nguyễn Quang Sáng.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-354.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**
Ngày phản biện: **22/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Khan, M., Afaq, S. K., Khan, N. U., & Ahmad, S. (2014), "*Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design*". ISRN Mechanical Engineering.

[2]. Chen, S. C., Jong, W. R., & Chang, J. A. (2006), "*Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line*". Journal of Applied Polymer Science, 101(2), 1174-1180.

[3]. Yu, M.-C., Young, W.-B., & Hsu, P.-M. (2007), "*Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system*". Materials Science and Engineering: A, 460, 288-295.

[4]. Meckley, J., & Edwards, R. (2009), "*A study on the design and effectiveness of conformal cooling channels in rapid tooling inserts*". The Technology Interface Journal, 10(1), 1-28.

[5]. Hsu, F., Wang, K., Huang, C., & Chang, R. (2013), "*Investigation on conformal cooling system design in injection molding*". Advances in Production Engineering & Management, 8(2), 107.

[6]. Rahim, S. Z. A., Sharif, S., Zain, A. M., Nasir, S., & Mohd Saad, R. (2016), "*Improving the quality and productivity of molded parts with a new design of conformal cooling channels for the injection molding process*". Advances in Polymer Technology, 35(1).

[7]. Kitayama, S., Miyakawa, H., Takano, M., & Aiba, S. (2016), "*Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-10.

[8]. Wang, Y., Yu, K.-M., & Wang, C. C. (2015), "*Spiral and conformal cooling in plastic injection molding*". Computer-Aided Design, 63, 1-11.

[9]. He, B., Ying, L., Li, X., & Hu, P. (2016), "*Optimal design of longitudinal conformal cooling channels in hot stamping tools*". Applied Thermal Engineering, 106, 1176-1189.

[10]. Wang, G., Zhao, G., Li, H., & Guan, Y. (2009), "*Research on a new variotherm injection molding technology and its application on the molding of a large LCD panel*". Polymer-Plastics Technology and Engineering, 48(7), 671-681.

PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ CỦA LÒNG KHUÔN DƯƠNG VỚI CÁC THÔNG SỐ GIA NHIỆT KHÁC NHAU

TEMPERATURE DISTRIBUTION OF THE POSITIVE MOLD CAVITY WITH DIFFERENT HEATING PARAMETERS

Huỳnh Văn An, Trần Thế San, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Trà Kim Quyên*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 22144046@student.hcmute.edu.vn;
santt@hcmute.edu.vn;
hiendv@hcmute.edu.vn;
**quyenntk@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Ép phun là quá trình phun nhựa nóng chảy vào khuôn dưới áp lực, làm nguội để tạo sản phẩm như chén, vỏ điện thoại, linh kiện ô tô. Nhiệt độ khuôn ảnh hưởng lớn đến chất lượng sản phẩm. Nghiên cứu dự đoán nhiệt độ gia nhiệt khuôn dương 3D tiếp xúc nước, sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) và phương pháp Taguchi (mảng L9). Các thông số như độ dày khuôn, hốc nước, lưu lượng, nhiệt độ được tối ưu. Kết quả xác thực ANN dự đoán chính xác, hỗ trợ cài đặt máy ép phun, giảm thử sai, nâng cao chất lượng.

Từ khóa: *Ép phun; Nhiệt độ; Mạng nơ-ron nhân tạo; Taguchi.*

ABSTRACT

Injection molding involves injecting molten plastic into a mold under pressure, then cooling it to form products like bowls, phone cases, and automotive parts. Mold temperature significantly impacts product quality. This study predicts the heating temperature of a 3D positive mold surface in contact with water, using an Artificial Neural Network (ANN) and the Taguchi method (L9 orthogonal array). Parameters such as mold thickness, water cavity thickness, flow rate, and heating temperature are optimized. The ANN model, validated against experimental data, accurately predicts temperatures, aiding machine setup, reducing trial-and-error, and enhancing product quality.

Keywords: *Injection molding; Temperature; Artificial Neural Network; Taguchi.*

1. TỔNG QUAN

Ép phun là một trong những phương pháp sản xuất nhựa phổ biến nhất, được ứng dụng rộng rãi để tạo ra các sản phẩm từ đơn giản đến phức tạp với độ chính xác cao, phù hợp cho sản xuất hàng loạt nhờ khả năng tối ưu hóa thời gian chu kỳ và chi phí vận hành [1]. Chất lượng sản phẩm ép phun phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm thiết kế chi tiết, cấu trúc khuôn, loại vật liệu nhựa, và các thông số vận hành như áp suất, thời gian làm mát, và đặc biệt là nhiệt độ khuôn [2]. Nhiệt độ khuôn đóng vai trò then chốt trong việc kiểm soát các hiện tượng như co ngót, biến dạng, và độ hoàn thiện bề mặt của sản phẩm, như đã được nghiên cứu trong các tài liệu về ảnh hưởng của nhiệt độ khuôn đến độ co rút của các sản phẩm nhựa dạng tấm [3]. Do đó, việc phát triển các phương pháp gia nhiệt khuôn hiệu quả, đảm bảo sự phân bố nhiệt độ đồng đều, là một yêu cầu cấp thiết để nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất [4].

Trong bối cảnh đó, các hệ thống gia nhiệt tiên tiến đã được nghiên cứu và triển khai nhằm cải thiện hiệu quả truyền nhiệt trong khuôn ép phun. So với các phương pháp gia nhiệt truyền thống sử dụng đường nước thẳng hoặc vòng, các hệ thống gia nhiệt sử dụng hốc nước ôm sát bề mặt khuôn (conformal heating) mang lại khả năng kiểm soát nhiệt độ vượt trội, đặc biệt đối với các khuôn có hình dạng phức tạp [5]. Hệ thống này tận dụng các kênh gia nhiệt được thiết kế theo đường cong của bề mặt khuôn, giúp tối ưu hóa quá trình truyền nhiệt và giảm thiểu sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vùng khuôn [6]. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng việc áp dụng hốc gia nhiệt có thể giảm thời gian chu kỳ sản xuất và cải thiện độ chính xác kích thước của sản phẩm nhựa [7].

Nhóm nghiên cứu đã tiến hành thiết kế một mô hình thí nghiệm với khuôn dương mỏng, sử dụng hệ thống hốc nước ôm sát bề mặt cong để gia nhiệt, thay thế cho các đường nước truyền thống. Mục tiêu là đánh giá sự phân bố nhiệt độ của lòng khuôn dương dưới các thông số gia nhiệt khác nhau, từ đó xác định các điều kiện tối ưu cho quá trình ép phun. Để đảm bảo tính hệ thống và hiệu quả của thí nghiệm, phương pháp Taguchi đã được áp dụng thông qua phần mềm Minitab, cho phép thiết kế một tập hợp 27 thí nghiệm dựa trên các thông số đầu vào chính [8]. Các thông số được chọn bao gồm độ dày khuôn dương (1 mm, 1.8 mm, và thay đổi từ 1.8 mm đến 1 mm), độ dày hốc nước (3 mm, 5 mm, 8 mm), lưu lượng nước nóng (3, 5, 7.7 lít/phút), và nhiệt độ nước (40°C, 60°C, 80°C). Nhiệt độ bề mặt khuôn được đo sau 40 giây gia nhiệt để đánh giá sự phân bố nhiệt độ và hiệu quả của hệ thống [9].

Kết quả từ các thí nghiệm được sử dụng để huấn luyện một mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN), nhằm dự đoán nhiệt độ khuôn dưới các điều kiện thông số ngẫu nhiên. Mô hình ANN đã được chứng minh là một công cụ hiệu quả trong việc mô phỏng và tối ưu hóa các quá trình sản xuất phức tạp, đặc biệt trong ngành ép phun, nhờ khả năng xử lý các mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số đầu vào và đầu ra [10]. Việc sử dụng ANN không chỉ giúp giảm số lượng thí nghiệm cần thực hiện mà còn hạn chế phương pháp thử và sai, từ đó tiết kiệm thời gian và chi phí trong quá trình nghiên cứu và phát triển [5]. Kết quả dự đoán từ mô hình ANN cho thấy tiềm năng ứng dụng trong việc điều chỉnh các thông số gia nhiệt để đạt được sự phân bố nhiệt độ đồng đều, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu suất sản xuất [7].

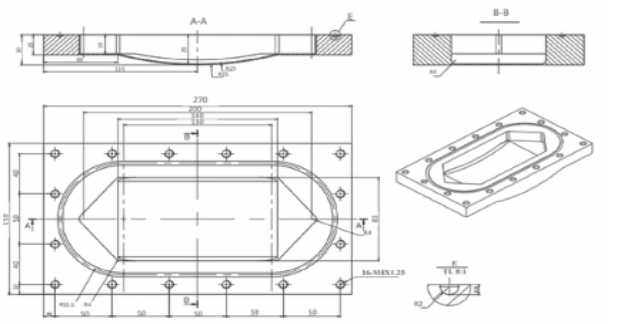
Mặc dù hệ thống gia nhiệt hốc nước mang lại nhiều lợi ích, nó cũng đối mặt với một số thách thức. Việc gia công các hốc nước ôm ☞

sát bề mặt khuôn đòi hỏi độ chính xác cao và công nghệ chế tạo tiên tiến, chẳng hạn như in 3D hoặc gia công CNC, dẫn đến chi phí sản xuất ban đầu cao [3]. Ngoài ra, việc duy trì lưu lượng và nhiệt độ nước nóng ổn định trong các kênh phức tạp có thể gặp khó khăn, đặc biệt trong các điều kiện sản xuất liên tục [6]. Những hạn chế này đòi hỏi các nghiên cứu tiếp theo tập trung vào tối ưu hóa thiết kế hốc nước và phát triển các vật liệu khuôn có khả năng dẫn nhiệt tốt hơn để giảm chi phí và tăng tính khả thi kinh tế [9].

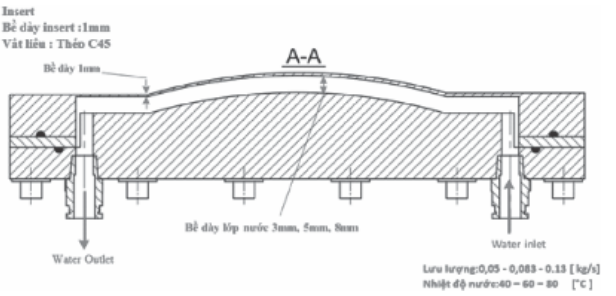
Tóm lại, việc nghiên cứu phân bố nhiệt độ của lòng khuôn dương với các thông số gia nhiệt khác nhau đã cung cấp những hiểu biết quan trọng về hiệu quả của hệ thống gia nhiệt hốc nước trong ép phun. Kết hợp phương pháp Taguchi và mô hình ANN đã cho phép nhóm nghiên cứu xác định các điều kiện tối ưu, đồng thời đặt nền tảng cho các cải tiến trong thiết kế khuôn và quy trình sản xuất. Trong tương lai, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc giảm chi phí gia công, tối ưu hóa thiết kế kênh gia nhiệt, và tích hợp các công nghệ mô phỏng tiên tiến để đưa hệ thống này vào ứng dụng thực tiễn một cách hiệu quả hơn.

2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

Trong chu kỳ phun ép, nếu nhiệt độ khuôn quá thấp, thời gian chu kỳ gia công sẽ kéo dài đồng thời dòng nhựa có khả năng không thể điền đầy vào khuôn [3]. Do đó phạm vi bài báo này dừng lại ở 3 tấm khuôn dương có kích thước bao là dài 270mm và rộng 150mm và phạm vi nghiên cứu trên tấm khuôn là chiều dài 140mm chiều dài và 70mm chiều rộng, với bề dày 3 tấm khuôn dương lần lượt là 1mm, 1.8mm và bề dày thay đổi từ 1.8mm đến 1mm. Bộ thông số đầu vào bao gồm bề dày hốc nước (đơn vị mm), lưu lượng nước đi qua hốc nước (lít/phút), nhiệt độ gia nhiệt (độ C), với thời gian gia nhiệt 40 giây. Từ thiết kế 3D, ta mô phỏng gia nhiệt các trường hợp bằng phần mềm Ansys và tiến hành gia công mô hình thực tế, sau đó dựa vào thiết kế thí nghiệm bằng phương pháp Taguchi trên phần mềm Minitab. Từ kết quả đó, ta có bộ thông số đã được thiết kế để tiến hành thí nghiệm đo nhiệt. Sau đó thu kết quả, xử lí số liệu qua phần mềm SmartView classic, và tiến hành training ANN trên phần mềm Matlab. Sau khi training ANN thì chúng tôi tiến hành so sánh nhiệt độ thực tế ở trường hợp ngẫu nhiên đo được không trùng với bộ thông số đầu vào với kết quả dự đoán của ANN đối với trường hợp đó, rồi đưa ra kết luận.



Hình 1. Mô hình nghiên cứu

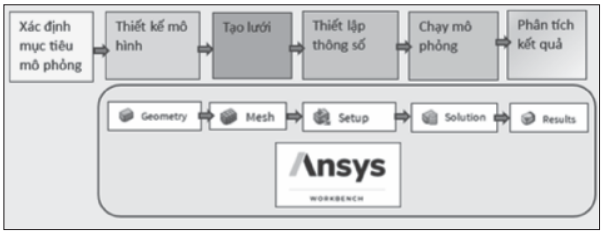


Hình 2. Mô hình kênh giải nhiệt

3. MÔ PHỎNG

Mục đích mô phỏng dòng chảy lưu chất cũng như nhiệt độ khi gia nhiệt của mô hình nghiên cứu là để giảm sai sót cũng như tối ưu trong quá trình thiết kế, giảm chi phí gia công mô hình nhưng vẫn đảm bảo độ hợp lí của mô

hình thí nghiệm sát với thực tế. Điều này cũng giúp có thể đánh giá sự khác nhau giữa nhiệt độ mô phỏng trên Ansys, trên thực tế đo khi thực nghiệm và khi kiểm nghiệm dự đoán của ANN. Sau khi thiết kế và thử mô phỏng mô hình thí nghiệm, chúng tôi tiến hành gia công các mô hình thí nghiệm thực tế.



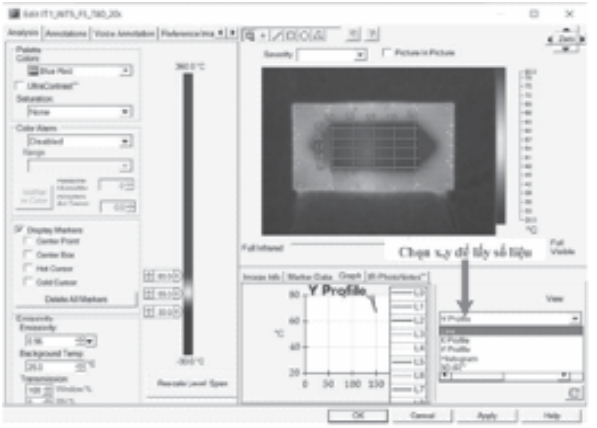
Hình 3. Trình tự mô phỏng Ansys



Hình 4. Kết quả mô phỏng

4. THỰC NGHIỆM SO SÁNH

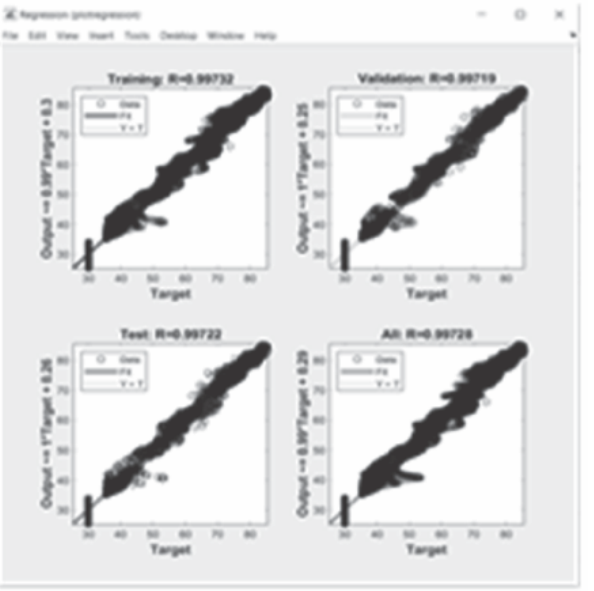
Sau khi mô phỏng mô hình 3D và gia công xong mô hình, chúng ta cần thiết kế thí nghiệm bằng phương pháp Taguchi và ở đây nhóm sử dụng phần mềm Minitab để thiết kế thí nghiệm.



Hình 5. Đo phân bố nhiệt độ bề mặt khuôn

Bảng 1. Kết quả thiết kế thí nghiệm

THÔNG SỐ PHÂN TÍCH THEO TAGUCHI			
STT	Bề dày hốc nước (mm)	Lưu lượng (lit/phút)	Nhiệt độ (độ C)
1	3	3	40
2	3	5	60
3	3	7.7	80
4	5	3	60
5	5	5	80
6	5	7.7	40
7	8	3	80
8	8	5	40
9	8	7.7	60



Hình 6. Kết quả đào tạo mạng ANN

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

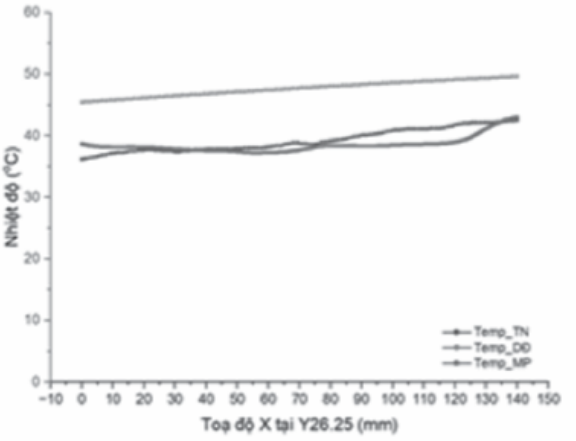
Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã xây dựng và đào tạo ba mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Network – ANN) tương ứng với ba trường hợp tấm khuôn dương có bề dày khác nhau: 1 mm, 1.8 mm và một trường hợp đặc biệt với sự thay đổi độ dày từ 1.8 mm đến 1 mm theo chiều dọc. Sau quá trình huấn luyện, các mạng ANN được đưa vào giai đoạn kiểm tra với các dữ liệu chưa từng thấy trước đó, đồng thời tiến hành đo thử nghiệm thực tế trên các mẫu khuôn đã gia công để tạo cơ sở ☞

so sánh. Kết quả từ mô phỏng bằng phần mềm Ansys, kết quả thực nghiệm và kết quả dự đoán từ mạng ANN được tổng hợp và đối chiếu với nhau nhằm đánh giá mức độ chính xác và độ tin cậy của phương pháp dự đoán bằng ANN.

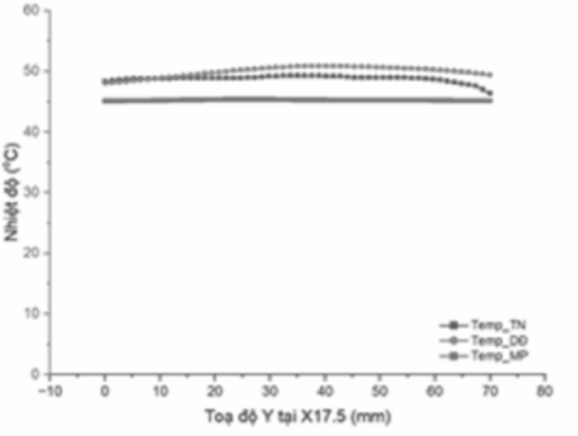
Để minh họa rõ hơn, các biểu đồ gia nhiệt theo thời gian được xây dựng và thể hiện ở Hình 6 (biểu đồ tại thời điểm 5 giây) và Hình 7 (biểu đồ tại thời điểm 20 giây). Các biểu đồ này mô tả sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn tại các thời điểm khác nhau trong chu kỳ gia nhiệt, với các đường biểu diễn tương ứng cho ba nguồn dữ liệu: thực nghiệm, mô phỏng bằng Ansys và dự đoán bởi ANN.

Hình 6 cho thấy sự phân bố nhiệt độ tại thời điểm 5 giây đầu tiên sau khi bắt đầu gia nhiệt. Tại giai đoạn này, rõ ràng có sự chênh lệch lớn giữa các đường biểu diễn. Điều này phản ánh hiện tượng gia nhiệt không đồng đều và không ổn định, chủ yếu do ảnh hưởng từ các yếu tố ngoại vi trong quá trình thí nghiệm thực tế – cụ thể là hiện tượng tụt nhiệt đột ngột khi xả nước nóng vào khuôn, làm ảnh hưởng đến hiệu suất ban đầu của máy gia nhiệt. Trong thời điểm này, mô hình ANN cũng chưa thể đưa ra dự đoán chính xác do dữ liệu đầu vào chưa đạt trạng thái ổn định, từ đó dẫn đến sai số cao giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng.

Tuy nhiên, bước sang thời điểm 20 giây (Hình 7), biểu đồ cho thấy sự hội tụ rõ ràng hơn giữa ba nguồn dữ liệu. Các đường biểu diễn dần tiến gần đến nhau, chứng tỏ hệ thống đã đạt được trạng thái ổn định trong quá trình gia nhiệt. Sai số giữa các giá trị mô phỏng, thực nghiệm và dự đoán ANN giảm đáng kể, phản ánh độ chính xác của mô hình ANN trong điều kiện loại bỏ các yếu tố ngoại vi. Điều này cũng chứng minh tính khả thi và độ tin cậy của ANN trong việc mô phỏng và dự đoán quá trình gia nhiệt của khuôn.



Hình 6. Biểu đồ gia nhiệt 5s



Hình 7. Biểu đồ gia nhiệt 20s

Nhận xét: Bên cạnh quá trình huấn luyện và kiểm nghiệm ANN, nghiên cứu còn tiến hành khảo sát thực nghiệm trên nhiều biến thể thiết kế của module hàn nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố cơ học và nhiệt đến chất lượng mối hàn. Kết quả cho thấy hình dạng mối hàn, lực ép và sự phân bố nhiệt độ đều là các yếu tố có vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm cuối cùng.

Đáng chú ý, module hàn được tích hợp cơ cấu kẹp linh hoạt, cảm biến nhiệt độ và hệ thống điều khiển hành trình tự động đã chứng minh được hiệu suất vượt trội trong thử

nghiệm. Thiết kế này không chỉ giúp đảm bảo sự ổn định trong quá trình truyền nhiệt mà còn cải thiện đáng kể sự đồng đều của nhiệt độ tại các vị trí khác nhau trên bề mặt khuôn. Các dữ liệu thu thập được từ hệ thống cảm biến cũng góp phần nâng cao độ chính xác của ANN thông qua việc cung cấp dữ liệu đầu vào phong phú và có độ phân giải cao.

Song song đó, các kịch bản hoạt động khác nhau cũng được mô phỏng bằng phần mềm Ansys để đánh giá khả năng ứng phó của hệ thống với các tình huống bất thường, chẳng hạn như phân bố nhiệt không đều hoặc biến dạng cục bộ. Việc này giúp phát hiện các điểm yếu tiềm tàng trong thiết kế, từ đó cho phép các kỹ sư điều chỉnh nhanh chóng nhằm tối ưu hóa cấu trúc module, giảm thiểu sai số và rút ngắn chu kỳ thiết kế.

6. KẾT LUẬN

Kết quả so sánh cho thấy nhiệt độ mô phỏng và thực nghiệm tương đồng, chứng minh vai trò của phần mềm mô phỏng trong chế tạo khuôn. Gia nhiệt bằng nước nóng và kênh giải nhiệt theo hình dạng sản phẩm đảm bảo nhiệt độ đồng đều. Khóa luận hoàn thành các mục tiêu, ứng dụng kiến thức vào thiết kế khuôn, tối ưu kênh giải nhiệt, phân tích dữ liệu nhiệt độ và so sánh mô phỏng – thực nghiệm. Đề tài thể hiện khả năng cải tiến, sử dụng công cụ kỹ thuật, và tạo ra sản phẩm: 3 tấm insert, 2 tấm chêm, 1 tấm cover, cùng hình ảnh phân bố nhiệt độ.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Võ Kim Hằng;
- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Huỳnh Văn An, Trần Thế San, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Trà Kim Quyên.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-339.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ljung, L. (1995), "*System identification toolbox for use with MATLAB*". The MathWorks Inc.
[2]. Johannaber, F. (1983), "*Injection molding machines*". Carl Hanser Verlag.
[3]. Sukanek, P. C., & Campbell, G. A. (1990), "*Advanced process monitoring in injection molding*". In SPE ANTEC Technical Papers (Vol. 36, p. 218).
[4]. Dontula, N. P., Sukanek, H., Devanathan, H., & Campbell, G. A. (1991), "*Simulation and modeling of polymer melt behavior*". Polymer Engineering and Science, 31, 1674.
[5]. Dubay, R., Diduch, C., & Li, W. G. (2004), "*Model-based predictive control of injection molding processes*". Polymer Engineering and Science, 44, 2318.
[6]. Bambang, P., & Dubay, R. (2002), "*Neural-network-based approach to injection molding process optimization*". Journal of Injection Molding Technology, 6, 247.
[7]. Ljung, L. (1999), "*System identification: Theory for the user*" (2nd ed.). Prentice-Hall Inc.
[8]. Dubay, R. (2002), "*Application of model predictive control in polymer processing*". ISA Transactions, 41, 81.
[9]. Agrawal, R., Pandelidis, I. O., & Pecht, M. (1986). SRC, 86.
[10]. Dubay, R., Gupta, Y. P., & Bell, A. C. (1998), "*Injection molding process modeling using neural networks*". Journal of Injection Molding Technology, 2, 37.

ĐẶC TRƯNG XOẮN VÀ KÉO ĐỨT CỦA MỘT SỐ MẪU CHỈ MAY THÔNG DỤNG TRÊN THỊ TRƯỜNG VIỆT NAM

TWIST AND TENSILE PROPERTIES OF SOME COMMON SEWING THREAD SAMPLES ON THE VIETNAM MARKET

Nguyễn Thị Thúy Ngọc*, Đinh Thị Xuân, Ngô Chí Trung
Trường Vật liệu, Đại học Bách khoa Hà Nội
**Email: ngoc.nguyenthithuy@hust.edu.vn*

TÓM TẮT

Các đặc trưng xoắn và kéo đứt của chỉ may là những thông số kỹ thuật quan trọng quyết định chất lượng đường may và hiệu suất may. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm độ săn, độ bền đứt và độ giãn đứt của 05 mẫu chỉ của các nhà sản xuất chỉ may trong nước. Kết quả nghiên cứu cho thấy các mẫu chỉ có độ săn, độ bền đứt và độ giãn đứt đảm bảo yêu cầu sản xuất hàng may mặc thông dụng và cả quần áo bảo hộ lao động phổ thông, trong đó 03 mẫu chỉ có lực kéo đứt cao nhất, đồng thời có độ săn chỉ cao nhất. Các kết quả nghiên cứu là những thông tin hữu ích giúp các nhà sản xuất hàng may mặc lựa chọn chỉ may phù hợp.

Từ khóa: *Chỉ may; Độ săn; Độ bền kéo đứt; Lực kéo đứt; Độ giãn đứt.*

ABSTRACT

The twist and tensile properties of sewing threads are important technical parame-ters that determine the quality of the seam and the sewing performance. This paper pre-sents the results of experimental research on the twist, breaking strength and elongation of 05 thread samples of domestic sewing thread manufacturers. The research results show that the sewing thread samples have twist, breaking strength and elongation that meet the requirements for the production of common garments and general work pro-tective cloths, among them, 03 thread samples have the highest breaking strength, while also having the highest twist. The research results are useful information to help garment manufacturers choose suitable sewing threads.

Keywords: *Sewing thread; Twist; Tensile strength; Breaking force; Elongation at break.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong ngành công nghiệp may, yêu cầu chất lượng đường may hết sức nghiêm ngặt và là một trong những yêu cầu hàng đầu đối với sản phẩm. Đường may cần đảm bảo độ bền và tuổi thọ nhất định, cần đảm bảo các yêu cầu ngoại quan như đúng quy cách, êm phẳng, không nhăn vặn. Chỉ may còn là yếu tố quan trọng, ảnh hưởng rất lớn đến năng suất quá trình may [1].

Trong quá trình may, chỉ may chịu tác động của rất nhiều yếu tố như lực, nhiệt, ẩm, gây nên các biến dạng khác nhau như kéo, uốn, xoắn, ma sát và các hiện tượng lão hóa, thay đổi ngoại quan, suy giảm độ bền và tuổi thọ do đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng đường may [2, 3].

Chỉ may phải được sản xuất từ loại xơ nguyên liệu chất lượng tốt và có độ bền cao để có khả năng may tốt nhất, phù hợp với yêu cầu may tốc độ cao không bị đứt chỉ trong quá trình may. Khả năng chịu mài mòn của chỉ liên quan chặt chẽ đến hiện tượng chỉ bị thay đổi hình thái và suy giảm độ bền trong quá trình may khi tiếp xúc với các bộ phận của thiết bị may và vật liệu vải. Chỉ phải mềm mại, trơn nhẵn và không có các điểm gút. Chỉ may thường được xử lý hoàn tất và bôi trơn để giảm ma sát. Chỉ may phải có độ săn cao để đảm bảo không bị sờn đứt nhưng vẫn phải đảm bảo cân bằng xoắn để tránh hiện tượng rối xoắn chỉ dẫn đến chất lượng tạo mũi may thấp [2].

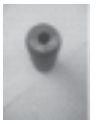
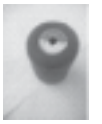
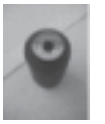
Chọn chỉ may phù hợp cho các mặt hàng sản xuất luôn là một trong những vấn đề các doanh nghiệp quan tâm hàng đầu. Bài báo này trình bày nghiên cứu khảo sát đặc trưng xoắn và kéo đứt của một số loại chỉ may được sử dụng phổ biến hiện nay trên thị trường Việt Nam, nhằm cung cấp thông tin cho các nhà sản xuất hàng may mặc khi lựa chọn chỉ may.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mẫu chỉ may

05 mẫu chỉ may của 05 nhà sản xuất chỉ trên thị trường Việt Nam được lựa chọn để khảo sát (bảng 1). Các mẫu chỉ đều có thành phần 100% polyester, chi số 60/3 (Tex 27). Đây là loại chỉ đang được sử dụng phổ biến cho nhiều mặt hàng may mặc từ đồ lót, quần, sơ-mi, áo khoác, chăn ga,…

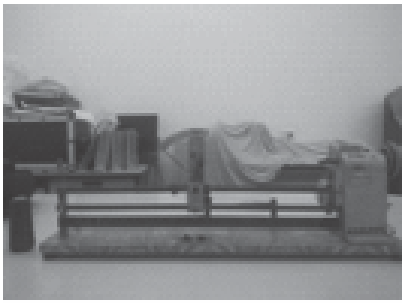
Bảng 1. Các mẫu chỉ khảo sát

Nhãn hiệu chỉ	Coast	Tiger	Dũng Đông	Thiên Lý	Hansung
Ký hiệu mẫu chỉ	CO	TG	DD	TL	HS
Mẫu cuộn chỉ					

Các đặc trưng xoắn và kéo đứt được chọn để khảo sát là độ săn, độ bền đứt và độ giãn đứt của chỉ. Trong số rất nhiều đặc trưng cấu trúc và tính chất của chỉ may ảnh hưởng quan trọng đến chất lượng đường liên kết trên hàng may mặc, các đặc trưng trên có vai trò quan trọng quyết định khả năng may và độ bền đường may trên vải.

2.2. Thực nghiệm xác định độ săn và độ bền kéo đứt của các mẫu chỉ

Các mẫu cuộn chỉ được thuần hóa trong môi trường nhiệt độ không khí 20±2°C, độ ẩm không khí 65±4% trong tối thiểu 24 giờ. Độ săn của chỉ được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D1423-2002 trên thiết bị đo độ săn GH-598 với chiều dài mẫu chỉ 250 mm và sức căng ban đầu 20 g (hình 1). Thực nghiệm kéo đứt chỉ may được thực hiện theo tiêu chuẩn ISO 2062-2009 trên thiết bị đo độ bền kéo của vải Tensile RT-1250A với chiều dài mẫu chỉ 150 mm và lực căng ban đầu 0,5 cN/tex (hình 2).



Hình 1. Đo độ săn của chỉ



Hình 2. Thực nghiệm kéo đứt chỉ

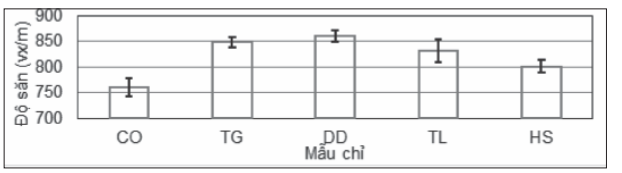
3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Độ săn của các mẫu chỉ

Kết quả đo độ săn của các mẫu chỉ được thể hiện trong bảng 2 và hình 3. Kết quả cho thấy mẫu chỉ Dũng Đông và Tiger có độ săn cao nhất và mức độ phân tán ít nhất trong các mẫu chỉ khảo sát. Mẫu chỉ Thiên Lý có độ săn thấp hơn chút nhưng mức độ dao động khá lớn. Chỉ Hansung và Coast có độ săn thấp nhất trong nhóm.

Bảng 2. Kết quả xác định độ săn của các mẫu chỉ

Mẫu đo	Độ săn (vx/m)				
	CO	TG	DD	TL	HS
1	756	840	860	864	812
2	752	852	844	820	808
3	772	860	872	840	812
4	740	856	868	804	784
5	784	836	860	832	792
Trung bình	761	849	861	832	802
Độ lệch chuẩn	17	10	11	22	13



Hình 3. Biểu đồ so sánh độ săn của các mẫu chỉ

3.2. Lực kéo đứt và độ giãn đứt của các mẫu chỉ

Kết quả đo lực kéo đứt và độ giãn đứt của các mẫu chỉ được thể hiện trong bảng 3, hình 4 và hình 5. Đường cong lực - độ giãn của quá trình kéo đứt các mẫu chỉ được thể hiện trong hình 6.

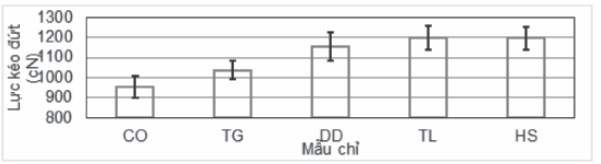
Các kết quả trên cho thấy các mẫu chỉ Thiên Lý và Hansung có lực kéo đứt ngang nhau và cao nhất trong nhóm, mẫu chỉ Dũng

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

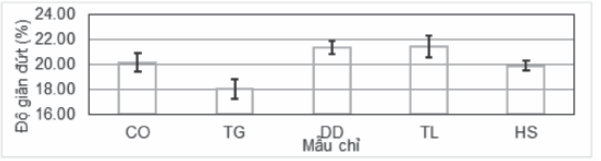
Đông có độ bền đứt thấp hơn không đáng kể. Ba mẫu chỉ này có lực kéo đứt cao nhất cũng tương ứng với độ săn chỉ cao nhất. Trong đó, chỉ Dũng Đông và Thiên Lý có độ giãn đứt cao trên 20%, điều này cho thấy hai mẫu chỉ này có khả năng phù hợp với cả nhóm vải dệt thoi và dệt kim, khả năng đảm bảo chất lượng đường may vừa bền và ngoại quan tốt. Mẫu chỉ Tiger có độ bền đứt và độ giãn đứt thấp mặc dù độ săn khá cao, khả năng đáp ứng cho nhóm vải dệt kim kém hơn. Chỉ Coast là mẫu chỉ có lực kéo đứt thấp nhất nhưng độ giãn tương đối cao. Tuy vậy, độ bền đứt của các mẫu chỉ trên đều đảm bảo yêu cầu đối với sản phẩm may mặc thông dụng và thậm chí cả sản phẩm quần áo bảo hộ lao động phổ thông theo TCVN 6689:2021 cũng như ISO 13688:2013.

Bảng 3. Kết quả xác định lực kéo đứt và độ giãn đứt của các mẫu chỉ

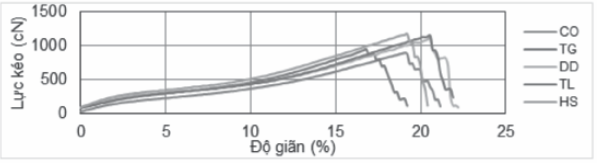
Mẫu đo	**Lực kéo đứt (cN)**					**Độ giãn đứt (%)**				
	CO	TG	DD	TL	HS	CO	TG	DD	TL	HS
1	932	1000	1206	1138	1069	19,05	17,10	21,60	20,85	19,50
2	941	1118	1030	1216	1196	19,50	18,60	20,85	21,75	19,80
3	990	1059	1049	1118	1206	20,55	18,00	20,55	21,00	19,95
4	892	1020	1108	1147	1167	19,95	18,15	21,60	20,55	20,25
5	932	1000	1206	1167	1147	20,70	16,80	21,75	21,15	20,40
6	1030	1020	1196	1245	1226	21,00	19,05	21,45	22,95	19,50
7	1020	1010	1206	1285	1236	21,15	17,85	21,60	21,00	19,95
8	863	990	1216	1255	1196	19,20	18,30	21,60	22,95	19,20
9	1000	1040	1187	1265	1245	20,40	17,55	20,55	21,30	20,10
10	932	1108	1147	1147	1265	19,95	19,20	22,05	20,55	20,25
Trung bình	953	1037	1155	1198	1195	20,15	18,06	21,36	21,41	19,89
Độ lệch chuẩn	55	45	69	61	57	0,74	0,78	0,52	0,89	0,39



Hình 4. Biểu đồ so sánh độ bền kéo đứt của các mẫu chỉ



Hình 5. Biểu đồ so sánh độ giãn đứt của các mẫu chỉ



Hình 6. Đường cong lực - độ giãn của các mẫu chỉ

4. KẾT LUẬN

Cả 05 mẫu chỉ của các nhà sản xuất chỉ may trong nước nói trên đều có các đặc trưng xoắn và kéo đứt đảm bảo yêu cầu sản xuất hàng may mặc thông dụng và bảo hộ lao động, đảm bảo khả năng may, độ bền và ngoại quan đường may tốt. Các mẫu chỉ Coast, Dũng Đông, Thiên Lý và Hansung có độ bền kéo đứt và độ giãn đứt cao, khả năng đáp ứng đa dạng đối với các loại vải khác nhau. Mẫu chỉ Tiger phù hợp hơn với sản phẩm từ vải dệt thoi. Các kết quả nghiên cứu này là những thông tin hữu ích giúp các nhà sản xuất hàng may mặc lựa chọn chỉ may phù hợp.❖

Ngày nhận bài: **23/4/2025**
Ngày phản biện: **12/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. G. Sundaresan, K. R. Salhotra, P. K. Hari (1998), "*Strength reduction in sewing threads during high speed sewing in industrial lockstitch machine – Part II: Effect of thread and fabric properties*". International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 10(1), 64-72.

[2]. V. K. Midha1 and A. Mukhopadhyay, R. Chattopadhyay and V. K. Kothari (2009), "*Effect of Process and Machine Parameters on Changes in Tensile Properties of Threads during High-speed Industrial Sewing*". Textile Research Journal, Vol. 80(6), 491-507.

[3]. Isao Ajiki, Ron Postle (2003), "*Viscoelastic properties of threads before and after sewing*". International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 15(1), 16-27.

THỰC NGHIỆM KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA KẾT CẤU VÁCH ĐẾN TỔN THẤT NHIỆT CỦA HẦM BẢO QUẢN LẠNH TRÊN TÀU CÁ VỎ GỖ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE INFLUENCE OF BULKHEAD STRUCTURE ON THERMAL LOSS IN REFRIGERATED FISH HOLDS OF WOODEN FISHING BOATS

TS. **Phạm Thanh Nhựt**
Trường Đại học Nha Trang
Email: nhutpt@ntu.edu.vn

TÓM TẮT

Kết cấu hầm bảo quản lạnh trên tàu cá vỏ gỗ đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm sau khai thác. Trong nghiên cứu này, 03 mẫu hầm bảo quản lạnh của tàu cá vỏ gỗ được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm. Kết cấu của vách hầm mô hình được thiết kế như của tàu thật với chiều dày lớp xốp cách nhiệt thay đổi lần lượt là 70mm, 100mm và 150mm (chiều dày lớp ván vỏ và ván ốp giữ nguyên). Hầm mô hình chứa 80% đá xay, được ngâm trong bể chứa nước biển trong thời gian chuyến biển 10 ngày. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình hầm với lớp xốp cách nhiệt dày 100mm cho hiệu quả cách nhiệt tốt hơn các mẫu khác. Bên cạnh đó, thời gian chuyến biển tốt nhất là không quá 7 ngày nhằm hạn chế tổn thất nhiệt qua vách.

Từ khóa: *Tàu cá; Bảo quản lạnh; Tổn thất nhiệt; Kết cấu vách; Lớp cách nhiệt.*

ABSTRACT

The refrigerated fish hold structure on wooden fishing boats plays a critical role in preserving the quality of harvested products. In this study, three scaled refrigerated fish hold models of wooden-hull fishing boats were designed, fabricated, and tested. The hull structures of the models replicate actual boat configurations, with varying insulation foam thicknesses of 70 mm, 100 mm, and 150 mm, while keeping the thicknesses of the inner and outer plywood layers constant. Each model hold was filled with 80% ice and submerged in a seawater tank to simulate a 10-day fishing voyage. The results indicate that the model with 100 mm insulation foam exhibited superior thermal insulation performance compared to the others. Furthermore, the optimal voyage duration should not exceed seven days to minimize thermal loss through the hold walls.

Keywords: *Fishing boat; Cold storage; Heat loss; Bulkhead structure; Insulation layer.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Một trong những tổn thất lớn trên tàu cá vỏ gỗ đang được quan tâm hiện nay là tổn thất sau thu hoạch mà nguyên nhân chủ yếu là do công tác bảo quản sau thu hoạch chưa đảm bảo. Theo [1], mức tổn thất sau thu hoạch của ngành khai thác hải sản ước tính mỗi năm khoảng trên 20%, thậm chí lên đến 30%. Việc thiết kế và chế tạo hầm bảo quản lạnh không phù hợp cũng dẫn đến thất thoát nhiệt trong hầm [2]. Quy trình bảo quản đã được Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn Việt Nam ban hành trong tài liệu hướng dẫn kỹ thuật vào năm 2019 [3].

Về kết cấu hầm bảo quản, tùy theo vật liệu chế tạo vỏ tàu mà kết cấu vách bảo quản là khác nhau. Đối với tàu vỏ gỗ, hầm lạnh chủ yếu được thiết kế kiểu sandwich gồm 3 lớp: ván vỏ – lớp xốp Polystyro (cách nhiệt) – lớp ván ốp [4].

Về phương pháp bảo quản lạnh và vật liệu cách nhiệt sử dụng trên tàu cá, Le Duc Trung [5] đã giới thiệu tổng quan về tổn thất sau thu hoạch và đề xuất giải pháp hạn chế tổn thất trong đánh bắt cá. Wibawa, P.A. và cộng sự [6] cho rằng lợi ích kinh tế mà ngư dân có thể thu được chủ yếu phụ thuộc vào chất lượng sản phẩm đánh bắt của họ. Nhóm tác giả đã nghiên cứu hiệu quả của phương pháp bảo quản cá bằng đá vảy so với đá khối. Nuzuli Fitriadi và cộng sự [7] đã nghiên cứu sử dụng vật liệu xơ dừa và Polyurethane để cách nhiệt cho hầm bảo quản trên tàu cá truyền thống. Đánh giá lợi ích của việc sử dụng chất làm lạnh tự nhiên trong chuỗi lạnh hải sản ở Ấn Độ đã được Santosh Kumar Saini và cộng sự thực hiện [8]. Theo đó, toàn bộ các chuỗi làm lạnh được nghiên cứu, từ khâu thu hoạch cá, vận chuyển, phân loại, chế biến và bảo quản lâu dài. Trong nghiên cứu của Muhammad Abidin và cộng sự [9], vật liệu cách nhiệt trong hầm lạnh tàu cá được sử dụng là trấu (rice husk) thay cho xốp truyền thống (styrofoam). Kết quả cho thấy trong thời gian 24 giờ, tổn thất nhiệt của trấu gần tương đương với xốp.

Về bài toán truyền nhiệt và thiết kế, chế tạo hầm hoặc kho bảo quản lạnh, các nghiên cứu chủ yếu giới thiệu về truyền nhiệt và bảo quản lạnh cho các loại kho lạnh, tủ lạnh,… với các kiểu kết cấu vách và vật liệu khác nhau. Phạm Thanh Nhựt và cộng sự [10] đã tính toán tổn thất nhiệt cho một hầm bảo quản cá trên tàu vỏ composite. Nguyễn Đình Khương và cộng sự [4] đã nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình bảo quản lạnh của kết cấu hầm bảo quản sử dụng vật liệu Polystyro foam trên tàu cá vỏ gỗ.

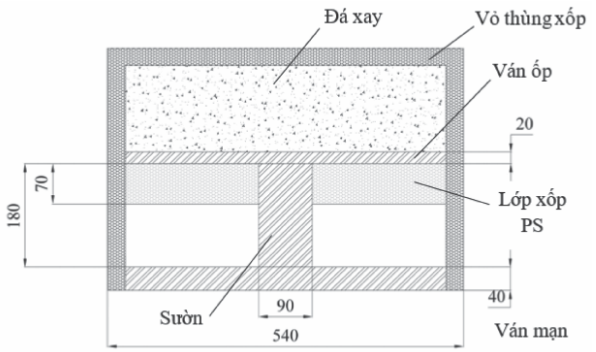
2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Ba mô hình (mẫu) hầm cá tàu vỏ gỗ có kích thước phủ bì dài x rộng x cao = 540 x 400 x 315 (mm). Một mặt của hầm (vách hầm) được thiết kế và chế tạo như vách hầm cá thật trên tàu với chiều dày lớp cách nhiệt mỗi mô hình lần lượt là 70mm, 100mm và 150mm. Đây chính là vách hầm cần nghiên cứu tổn thất nhiệt. Chiều dày của lớp gỗ trong cả ba mẫu thí nghiệm là không thay đổi. Thông số cụ thể của các vật liệu thể hiện ở Bảng 1 và Hình 1.

Bảng 1. Thông số vật liệu của các mẫu thực nghiệm

Mô hình số	Gồm các lớp	Độ dày	Hệ số dẫn nhiệt λ (W/m.°K)
1	Vách gỗ trong (ván ốp)	0,02	0,13
	Lớp cách ẩm	0,0005	0,001
	Xốp cách nhiệt	0,070	0,038
	Lớp cách ẩm	0,0005	0,001
	Lớp không khí	0,105	0,024
	Vách gỗ ngoài (ván mạn)	0,04	0,13
2	Vách gỗ trong (ván ốp)	0,02	0,13
	Lớp cách ẩm	0,0005	0,001
	Xốp cách nhiệt	0,1	0,038
	Lớp cách ẩm	0,0005	0,001
	Lớp không khí	0,08	0,024
	Vách gỗ ngoài (ván mạn)	0,04	0,13
3	Vách gỗ trong (ván ốp)	0,02	0,13
	Lớp chống thấm	0,0005	0,001
	Xốp cách nhiệt	0,15	0,038
	Lớp chống thấm	0,0005	0,001
	Lớp không khí	0,03	0,024
	Vách gỗ ngoài (ván mạn)	0,04	0,13



Hình 1. Mẫu số 1 có lớp cách nhiệt dày 70mm

Để tạo ra một môi trường thực nghiệm gần giống với thực tế, bể thực nghiệm được thiết kế và chế tạo có kích thước dài x rộng x cao = 2000 x 1000 x 1200 (mm), chứa 2000 lít nước biển được làm lạnh bởi hệ thống lạnh đến nhiệt độ 25°C.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

- Xác định tổn thất nhiệt qua vách hầm:

Để xác định tổn thất nhiệt qua vách hầm, trước hết cần thử nghiệm để tìm mật độ dòng nhiệt qua vách qua công thức [11]:

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{w1} - t_{w2}) \quad (1)$$

Trong đó: t_{w1}, t_{w2} là nhiệt độ bên trong và bên ngoài vách (°C).

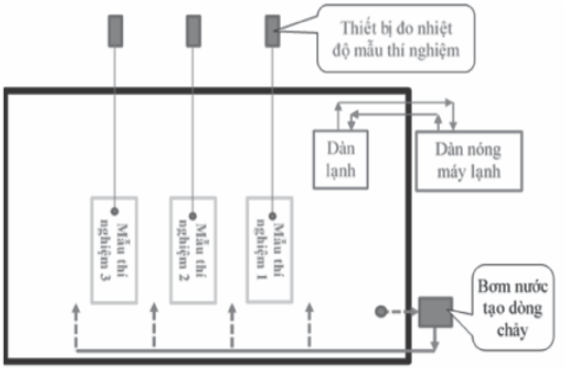
Theo (1), để tìm q ta cần biết nhiệt độ tại 2 bề mặt của kết cấu vách, chủ yếu là lớp xốp cách nhiệt. Do đó, thí nghiệm đầu tiên là xác định nhiệt độ bên trong và bên ngoài lớp cách nhiệt sau khi nhiệt độ bên trong hầm ổn định.

- Xác định ảnh hưởng chiều dày lớp cách nhiệt đến tổn thất nhiệt trong thời gian chuyến biển 10 ngày:

Thí nghiệm tiếp theo là khảo sát sự thay đổi nhiệt độ bên ngoài lớp cách nhiệt theo thời gian chuyến biển 10 ngày (sau khi nhiệt độ bên trong hầm đã ổn định) nhằm đánh giá sự ảnh hưởng của chiều dày lớp cách nhiệt đến tổn thất nhiệt qua kết cấu vách theo thời gian chuyến biển 10 ngày.

- Phương pháp chạy thử nghiệm:

Nước biển trong bể chứa được làm lạnh bởi hệ thống lạnh đến nhiệt độ 25°C. Bơm nước ly tâm tạo dòng chảy liên lục vào hai vách của mẫu thí nghiệm, giống như tàu đang di chuyển liên tục trên mặt nước. Ba mẫu thử được đổ 80% đá xay vào bên trong và được dìm trong bể nước biển với độ ngập 70% như hầm cá trên tàu (Hình 2).



Hình 2. Sơ đồ bố trí mô hình bể thực nghiệm

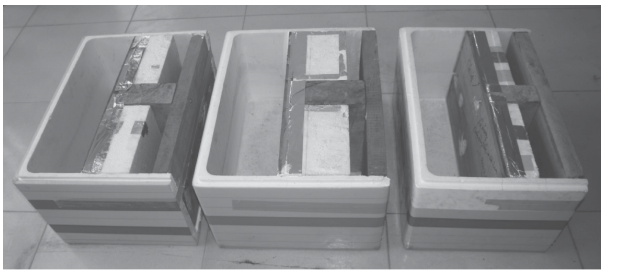
- Phương pháp lấy dữ liệu:

Mỗi mẫu thí nghiệm đặt 2 đầu đo cảm biến nhiệt ở mặt trong và mặt ngoài của lớp xốp cách nhiệt. Nhiệt độ được theo dõi và ghi chép 30 phút mỗi lần. Kết quả cuối cùng là trung bình cộng của 3 mẫu.

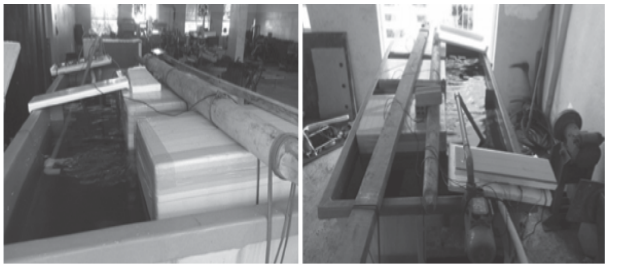
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả chế tạo và thử nghiệm mô hình hầm cá

Mô hình hầm bảo quản cá được thể hiện ở Hình 3, mô hình bể thí nghiệm với 3 mô hình hầm cá được thể hiện ở Hình 4.



Hình 3. Mô hình hầm cá tàu vỏ gỗ



Hình 4. Mô hình bể thí nghiệm đang hoạt động

3.2. Kết quả đo sau khi nhiệt độ bên trong hầm ổn định

Kết quả đo sau khi nhiệt độ bên trong hầm ổn định được thể hiện ở Bảng 2, nhiệt độ trung bình của vách tính từ khi nhiệt độ bên trong hầm ổn định và tổn thất nhiệt được thể hiện ở Bảng 3.

Bảng 2. Kết quả đo nhiệt độ hai bên lớp xốp cho đến khi nhiệt độ bên trong ổn định

Mốc thời gian (giờ)	Mẫu 1 (lớp cách nhiệt dày 70mm)		Mẫu 2 (lớp cách nhiệt dày 100mm)		Mẫu 3 (lớp cách nhiệt dày 150mm)	
	Nhiệt độ mặt trong, °C	Nhiệt độ mặt ngoài, °C	Nhiệt độ mặt trong, °C	Nhiệt độ mặt ngoài, °C	Nhiệt độ mặt trong, °C	Nhiệt độ mặt ngoài, °C
Ban đầu	3,5	16,3	3,6	20,6	3,5	23,8
1	3,4	16,0	3,5	20,4	3,0	23,7
1,5	3,2	15,9	3,2	20,1	2,7	23,5
2	2,8	15,5	2,9	19,8	2,2	23,3
2,5	2,3	15,2	2,4	19,5	2,0	23,1
3	2,0	15,0	2,1	19,3	1,6	22,9
3,5	1,7	15,7	1,7	19,1	1,4	22,8
4	1,4	15,6	1,3	18,8	1,0	22,5
4,5	1,0	16,1	1,0	18,6	1,0	21,8
5	1,0	16,7	1,0	18,4	1,0	21,2
5,5	1,0	17,5	1,0	18,2	1,0	20,7

Bảng 3. Nhiệt độ trung bình và tổn thất nhiệt của vách

Thông số	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3
Nhiệt độ trung bình vách trong t_{w1} (°C)	1,00	1,00	1,00
Nhiệt độ trung bình vách ngoài t_{w2} (°C)	16,77	18,40	21,55
Tổn thất nhiệt của vách Q (W)	1,18	0,86	0,77

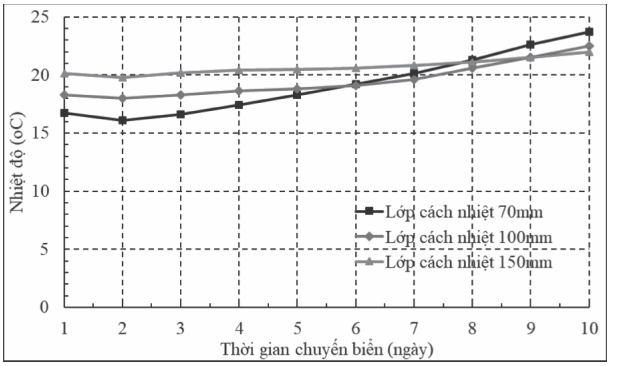
3.3. Kết quả đo nhiệt độ trong thời gian chuyển biển 10 ngày

Kết quả đo nhiệt độ trong thời gian chuyển biển 10 ngày được thể hiện ở Bảng 4 và Hình 5.

Bảng 4. Kết quả đo nhiệt độ theo thời gian chuyển biển

Mốc thời gian (ngày)	Nhiệt độ mặt ngoài vách ứng với từng chiều dày lớp xốp (°C)		
	70 (mm)	100 (mm)	150 (mm)
1	16,7	18,3	20,1
2	16,1	18,0	19,8
3	16,6	18,3	20,2
4	17,4	18,6	20,4
5	18,3	18,8	20,5
6	19,2	19,1	20,6
7	20,1	19,6	20,8
8	21,3	20,6	21,1
9	22,6	21,5	21,5
10	23,7	22,5	22,0

☞



Hình 4. Biểu đồ thay đổi nhiệt độ trong thời gian chuyến biển

3.4. Thảo luận

- Từ Bảng 2 cho thấy nhiệt độ bên trong hầm hầu như giống nhau cho cả 3 loại mẫu, sau khi giảm đến khoảng 4 giờ thì nhiệt độ trong hầm bắt đầu ổn định ở 1°C. Tuy nhiên, nhiệt độ bên ngoài hầm khác nhau đáng kể. Nhiệt độ của mẫu 1 (lớp xốp dày 70mm) nhỏ nhất và mẫu 3 (lớp xốp dày 150mm) cao nhất. Trong đó, nhiệt độ bên ngoài vách mẫu 1 giảm dần từ ban đầu đến 4 giờ sau đó tăng trở lại, trong khi nhiệt độ của mẫu 2 và 3 tăng đều từ 0 giờ đến 5,5 giờ. Điều này cho thấy nhiệt độ thẩm thấu quá vách của mẫu 1 khá nhanh trong khi mẫu 2 và 3 khá ổn định.

- Bảng 3 cho thấy tổn thất nhiệt qua vách của mẫu 1 là khá cao (1,18W) trong khi mẫu 2 và 3 thấp hơn và chênh nhau không đáng kể (0,86W và 0,77W).

- Bảng 4 và Hình 5 cho thấy sau ngày đầu tiên giảm do nhiệt độ thẩm thấu nhanh qua vách, nhiệt độ bên ngoài vách đã tăng liên tục từ ngày thứ 2 đến ngày thứ 10. Trong đó, nhiệt độ tăng mạnh hơn sau ngày thứ 7. Điều này cho thấy đối với tàu cá vỏ gỗ, thời gian chuyến biển tốt nhất là không quá 7 ngày nhằm hạn chế tổn thất nhiệt. Nhiệt độ của mẫu 3 biến thiên ít và khá ổn định, trong khi nhiệt độ của mẫu 1 và 2 biến thiên nhanh và vượt qua mẫu 3 sau khoảng 6 ngày đến 8 ngày. Nhìn chung nhiệt độ của mẫu 2 và 3 khá gần nhau trong toàn bộ thời gian chuyến biển. Do đó, việc tăng lớp xốp quá lớn giúp hạn chế tổn thất nhiệt không đáng kể trong khi chi phí chế tạo tăng lên.

4. KẾT LUẬN

- Việc chế tạo và thử nghiệm mô hình hầm cá tàu vỏ gỗ là rất cần thiết để đánh giá tổn thất nhiệt của hầm bảo quản trong khi tính toán lý thuyết chưa có độ tin cậy.

- Kết quả nghiên cứu cho thấy chiều dày lớp xốp cách nhiệt nên được chọn là 100mm sẽ đảm bảo tốt hơn về hiệu quả kinh tế. Cùng với đó, thời gian chuyến biển tốt nhất là không quá 7 ngày nhằm hạn chế tổn thất nhiệt qua vách hầm.

- Cần tiếp tục nghiên cứu thêm về ảnh hưởng của chiều dày lớp ván vỏ và ván ốp để đánh giá tổn thất nhiệt một cách toàn diện hơn.❖

Ngày nhận bài: **16/4/2025**
Ngày phản biện: **05/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Trí Ái, Nguyễn Như Sơn (2019), "*Hiện trạng công nghệ bảo quản sản phẩm trên tàu cá xa bờ các tỉnh phía Nam*". Tạp chí Khoa học Công nghệ và Thực phẩm, No. 18(2), pp. 110-121.

[2]. Michael Shawyer and Avilio F. Medina Pizzali (2003), "*The use of ice on small fishing vessels*". Food and Agriculture Organization of the United Nations.

[3]. Tổng cục Thủy sản (2019), "*Tài liệu hướng dẫn kỹ thuật: Quy trình bảo quản sản phẩm trên tàu khai thác hải sản xa bờ*". Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn.

[4]. Nguyễn Đình Khương (2018), "*Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình bảo quản lạnh của kết cấu hầm bảo quản sử dụng vật liệu Polystyro foam trên tàu cá vỏ gỗ*", Luận văn Thạc sĩ.

[5]. Le Duc Trung (2017), "*Postharvest losses of fisheries in Vietnam an overview and some solutions*". Journal of Technical Education Science, No. 43, pp. 47-54.

[6]. Wibawa, P.A., Birmingham R.W., Warmadewanthi I.D.A.A (2022), "*Comparing Life Cycle Assessment of Fish Preservation Method on Fishing Vessels in Indonesia*". Earth and Environmental Science, No, 1095.

[7]. Nuzuli Fitriadi, Balkhaya, Herdi Susanto (2023), "*Cocopeat insulated cold storage performance on traditional fishing boats*". American Institute of Physics Conference Series.

[8]. Santosh Kumar SAINI, Mani Sankar DASGUPTA, Kristina N. WIDELL, Souvik BHATTACHARYYA (2022). "*Assessment of benefits of employing natural refrigerants in seafood cold chain in India*", 15th IIR-Gustav Lorentzen conference on Natural Refrigerants.

[9]. Muhammad Abidin, Alam Baheramsyah, Ede Mehta Wardhana (2018), "*Cooling System Design for Cold Storage of Traditional Fishing Boat Using Insulation from Rice Husk*". International Journal of Marine Engineering Innovation and Research, Vol 3(1), pp. 34-39.

[10]. Phạm Thanh Nhựt, Trịnh Văn Bình, Trần Đình Tứ (2022), "*Xác định lượng tổn thất nhiệt và đề xuất giải pháp nâng cao hiệu quả bảo quản lạnh trên tàu cá vỏ composite*", Tạp chí Khoa học - Công nghệ Thủy sản, Số 4/2022, pp. 42-50.

[11]. Nguyễn Đức Lợi (2006), "*Hướng dẫn thiết kế hệ thống lạnh*", NXB Khoa học và Kỹ thuật.

NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN PHỤ TẢI BẰNG SÓNG ĐỂ ĐIỀU CHỈNH DUNG LƯỢNG BÙ PHÂN TÁN LƯỚI TRUNG ÁP 35KV NHẰM GIẢM TỔN THẤT ĐIỆN NĂNG

RESEARCH ON USING RIPPLE CONTROL SYSTEM TO ADJUST DISTRIBUTED COMPENSATION CAPACITY OF 35KV MEDIUM VOLTAGE GRID TO REDUCE ELECTRICITY LOSS

Nguyễn Thị Bích Hậu*, Đỗ Đức Thành
Khoa Cơ - Điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất
**Email: hauhumg123@gmail.com*

TÓM TẮT

Quá trình bù công suất phản kháng trong mạng lưới điện với phương pháp bù phân tán mang lại hiệu quả tốt hơn thay vì bù tập trung tại một vị trí. Hiệu quả tối ưu phụ thuộc vào việc xác định dung lượng bù, vị trí đặt hợp lý theo thông số phụ tải thực tế của mạng lưới điện. Quá trình thu thập dữ liệu phụ tải và thực hiện quá trình điều khiển đóng-cắt dung lượng bù có thể được thực hiện bằng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (Ripple Control). Bài báo này sử dụng thuật toán điều khiển tính toán dung lượng bù theo suất giảm chi phí tổn thất công suất và thời gian thu hồi vốn đầu tư nhằm giảm tổn thất trong mạng lưới điện đến mức tối thiểu. Lưới trung áp 35kV vùng Uông Bí, Quảng Ninh được khảo sát và kiểm nghiệm cho hiệu quả của quá trình đóng-cắt dung lượng bù.

Từ khóa: *Bù công suất phản kháng; Điều khiển bằng sóng; Lưới trung áp; Tổn thất điện năng.*

ABSTRACT

The process of compensating reactive power in the power grid with the distributed compensation method brings better efficiency than centralized compensation at one location. The optimal efficiency depends on determining the compensation capacity and the appropriate location according to the actual load parameters of the power grid. The process of collecting load data and implementing the process of controlling the opening-closing of compensation capacity is executed by the ripple control system (Ripple Control). This paper uses the control algorithm to calculate the optimal compensation capacity according to the power cost reduction rate and the investment recovery time to minimize losses in the power grid. The 35kV medium-voltage grid in Uong Bi, Quang Ninh, is surveyed and tested for the efficiency of the closing-opening of compensation capacity.

Keywords: *Reactive power compensation; Ripple control; Medium voltage grid; Power loss.*

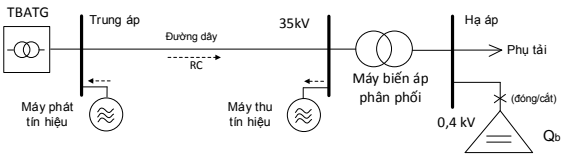
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vấn đề sử dụng hiệu quả và tiết kiệm năng lượng hiện nay đang được quan tâm khi mà các nguồn năng lượng sơ cấp ngày càng cạn kiệt. Theo chương trình quản lý nhu cầu điện (Demand Side Management - DSM) điều khiển phụ tải trực tiếp sao cho hiệu quả và kinh tế, phù hợp với khả năng cung cấp của nguồn điện luôn là một giải pháp được ưu tiên hàng đầu.

Ứng dụng của hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (Ripple Control - RC) [2] trong việc tiết kiệm năng lượng đối với các hệ thống như điều khiển linh hoạt hệ thống chiếu sáng công cộng, điều khiển giá điện cho công tơ nhiều giá, hệ thống thu thập dữ liệu và điều khiển giám sát từ xa (SCADA), sử dụng kênh truyền thông tin RC để điều khiển đóng - cắt các phụ tải điện từ trung tâm điều khiển… Quá trình nghiên cứu về lý thuyết và phân tích khả năng ứng dụng của công nghệ điều khiển phụ tải bằng sóng chưa được xem xét đầy đủ, đặc biệt là áp dụng điều chỉnh nhu cầu tiêu thụ điện của phụ tải DSM để đóng-cắt dung lượng bù nhằm giảm tổn thất năng lượng trong lưới trung áp.

Bài toán bù công suất phản kháng là giải pháp phổ biến để giảm tổn thất điện năng và đảm bảo chất lượng điện áp trong mạng lưới điện [1], [4], [5], [6], [8], [9]. Hiệu quả bù phụ thuộc vào tham số của mạng, dung lượng bù và vị trí đặt của thiết bị bù [4], [5]. Thông số của tải thay đổi liên tục theo thời gian trong ngày, nên việc đặt bù với dung lượng bù cố định không mang lại hiệu quả cao [6]. Do đó, việc thu thập số liệu phụ tải thời gian thực và tính toán lại vị trí bù hợp lý là một yêu cầu cấp thiết. Quá trình này có thể được sử dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (Ripple Control - RC).

Sơ đồ nguyên lý ứng dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng trên đường dây trung áp được đưa ra trên Hình 1. Trong đó, hệ thống thông tin tải ba (Power Line Carrier - PLC) sử dụng sóng cao tần mang thông tin điều khiển (RC) xếp chồng với dạng sóng điện áp trên đường dây tải điện [2]. Phía trạm biến áp phân phối (35kV/0,4kV) nhận tín hiệu điều khiển từ trạm biến áp trung gian (TBATG) thực hiện chức năng đóng-cắt dung lượng bù để đạt được tối thiểu hóa mức tổn thất công suất (tổn thất điện năng) trên mạng lưới điện.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng RC

2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Bài toán bù công suất phản kháng

Quá trình bù công suất phản kháng được thực hiện phân tán tại các vị trí khác nhau trong mạng lưới điện. Nguyên tắc bù:

$$\frac{\partial \delta P}{\partial Q_b} = \frac{\partial (\Delta P_1 - \Delta P_2)}{\partial Q_b} = 0$$

Với ΔP_1, ΔP_2 - Tổn thất công suất trong lưới điện trước và sau khi bù, từ đó tính ra dung lượng bù $Q_b(t)$. Khi thông số phụ tải của lưới thay đổi theo thời gian trong ngày, trị số dung lượng bù cần phải thay đổi tương ứng để đạt hiệu quả bù cao nhất [6].

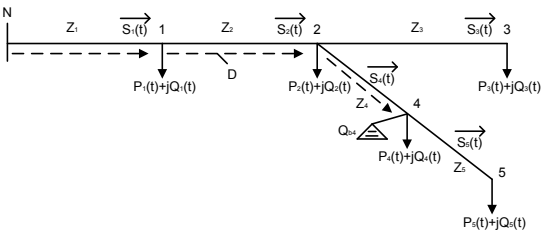
Với sơ đồ tính toán cho mạng lưới điện hình tia như trên Hình 2, kết quả bù tối ưu với dung lượng bù tại nút j được xác định theo công thức như sau: ☞

$$Q_{bj} = \frac{\sum_{i \in D} R_i Q_i}{\sum_{i \in D} R_i}$$

Trong đó: R_i là trị số điện trở của các dây dẫn trên đường đi (D) từ nguồn đến nút bù j [7].

2.2. Xác định vị trí, dung lượng bù tối ưu theo suất giảm chi phí tổn thất và thời gian thu hồi vốn đầu tư

Khi thực hiện bù công suất phản kháng, suất giảm chi phí tổn thất của thiết bị bù β là lợi nhuận thu được do giảm tổn thất khi bù 1 đơn vị công suất phản kháng: $\beta = \partial \Delta C / \partial \Delta Q_b$, đồng/kVar.năm [3]. Với hàm lợi nhuận: ΔC = g.τ.δP, với g - Giá bán điện, τ - Thời gian tổn thất công suất lớn nhất, δP - Độ giảm tổn thất công suất do đặt thiết bị bù [3]. Thời gian thu hồi vốn T_{th} cần thiết của thiết bị bù đạt tại nút j được xác định theo công thức sau:



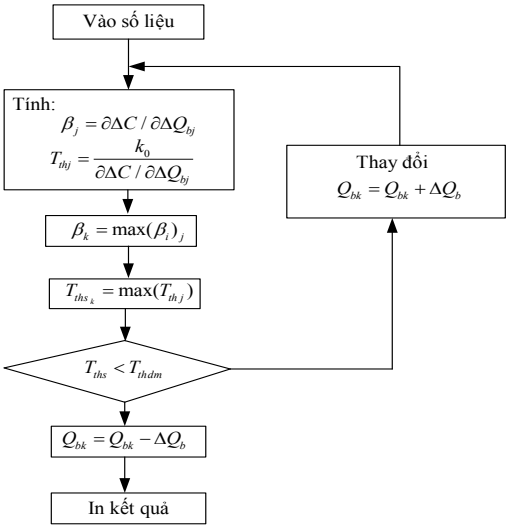
Hình 2. Sơ đồ hình tia có bù công suất phản kháng Q_b

$$T_{th} = \frac{k_0}{\partial \Delta C / \partial \Delta Q_{bj}}$$

Với: k_0 - Suất vốn đầu tư cho một đơn vị công suất bù đặt thêm (đồng/kVAr) [3].

Nhận thấy, hiệu quả của lượng công suất bù đặt thêm sẽ giảm dần đến 0 tại một giá trị $Q_{bù} = Q_{bmax}$, khi bù lớn hơn trị số này không những tổn thất không giảm mà còn bị tăng thêm (β < 0). Khi bù tại nhiều nút thì hiệu quả bù tại các nút khác bị giảm đi và hiệu quả bù tổng thể chỉ nhận được trong một phạm vi nhất định [3]. Do đó, trước hết cần xác định hiệu quả bù cho tất cả các nút và tìm ra vị trí nút có hiệu quả bù cao nhất. Tính toán dung lượng bù theo nấc tại các vị trí có hiệu quả bù cao nhất cho đến khi thời gian thu hồi vốn bằng thời gian định mức.

Sơ đồ thuật toán tính toán dung lượng bù cho các nút đảm bảo thời gian thu hồi vốn đầu tư nhỏ hơn một thời hạn quy định được đưa ra trên Hình 3. Trong đó cần xác định nút k có hiệu quả bù cao nhất (lớn nhất) và nút s có thời gian thu hồi vốn T_{ths} lớn nhất (kém hiệu quả nhất) [3]. Tiến hành tăng thêm dung lượng bù cho nút k (nút hiệu quả bù cao nhất) một lượng ΔQ_b và quay lại thực hiện bước 1 cho đến khi $T_{ths} \geq T_{thđm}$.



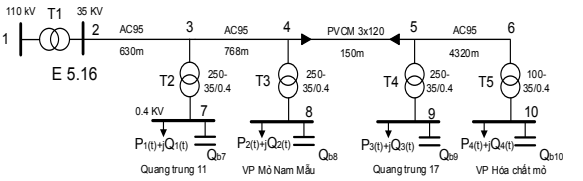
Hình 3. Sơ đồ thuật toán tính toán dung lượng bù tối ưu

3. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU VÀ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Sơ đồ nghiên cứu tính toán bù lưới trung áp 35kV vùng Uông Bí, Quảng Ninh cho trên Hình 4. Thông số về các máy biến áp và đường dây được cho trong Bảng 1 và Bảng 2 tương

ứng. Số liệu về phụ tải phía hạ áp $P_i(t)$, $Q_i(t)$ được thu thập theo thời gian thực sử dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng (RC) trên đường dây tải điện trung áp 35kV [2]. Quá trình điều chỉnh dung lượng bù tại các nút tải hạ áp theo thuật toán ở trên nhằm giảm tổn thất công suất trong mạng lưới điện trung áp.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý lưới trung áp 35kV

Bảng 1. Thông số về máy biến áp

TT	MBA	$U_{đm}$, kV	$S_{đm}$, kVA	U_C, kV	U_H, kV	$U_{n\ C-H}$, %	P_{Cu}, kW	P_{Fe}, kW	I_0,%
1	Trạm 110kV	110	10000	115	35	10,5	60	14	0,9
2	Quang Trung 11	35	250	35	0,4	4,5	4,1	0,68	7,5
3	VP Mỏ Nam Mẫu	35	250	35	0,4	4,5	4,1	0,68	7,5
4	Quang Trung 17	35	250	35	0,4	4,5	4,1	0,68	7,5
5	VP Hóa chất mỏ	35	100	35	0,4	6,5	2,4	0,9	8,0

Bảng 2. Thông số về đường dây

STT	Nút đầu	Nút cuối	Loại dây	L (km)	R_0, Ω/km	X_0, Ω /km
1	2	3	AC95	0,63	0,31	0,384
2	2	4	AC95	0,768	0,31	0,384
3	4	5	PVCM 3x120	0,15	0,153	0,12
4	5	6	AC95	0,432	0,31	0,384

3.2. Xác định vị trí và dung lượng bù hợp lý

Ứng dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng thu thập số liệu công suất tải phía hạ áp $P_i(t)$, $Q_i(t)$. Thông số phụ tải thay đổi theo thời gian giả định như trong Bảng 3. Dựa trên thông số sơ đồ nghiên cứu, thực hiện mô phỏng và tính toán tối ưu dung lượng bù theo thuật toán nêu ở trên sử dụng phần mềm mô phỏng CONUS [3] theo suất giảm chi phí tổn thất và thời gian thu hồi vốn khi đặt thiết bị bù.

Bảng 3. Bảng thông số phụ tải giả định theo thời gian

TT	$\%S_{max}$	MBA T1		MBA T2		MBA T3		MBA T4	
		$P_1(t)$	$Q_1(t)$	$P_2(t)$	$Q_2(t)$	$P_3(t)$	$Q_3(t)$	$P_4(t)$	$Q_4(t)$
0h - 8h	30	36	42	45	54	30	36	18	24
8h - 16h	70	84	98	105	126	70	84	42	56
16h - 20h	100	120	140	150	180	100	120	60	80
20h - 24h	70	84	98	105	126	70	84	42	56

☞

Các thông số kinh tế bù tối ưu: Giá bán điện bình quân là 2100 đ/kWh; thời gian tổn thất công suất lớn nhất là 4000h; giá thiết bị bù cấp 0,4kV là 500 nghìn đồng/kVAr; dung lượng đặt bù là 50kVAr; định mức thời gian thu hồi là 5 năm. Các phụ tải tiêu thụ được xem xét tại thời điểm có giá trị cực đại (tải 100% công suất lớn nhất). Kết quả phân tích hiệu quả bù bằng phần mềm CONUS [3] như sau:

PHAN TICH HIEU QUA BU
****

Nut	Suat giam CP ton that (ng.dong/kVar.nam)	Thoi gian thu hoi von (nam)
7	0.0	-
8	168.0	0.00
9	1176.0	0.00
10	1176.0	0.00

Từ kết quả phân tích hiệu quả bù nhận thấy là nút 9 và nút 10 có hiệu quả bù cao nhất (suất giảm chi phí tổn thất lớn nhất, 1176 nghìn đồng/kVAr.năm) nên tiến hành tính toán dung lượng bù tối ưu tại hai vị trí này. Kết quả tính toán dung lượng bù như sau:

KET QUA TINH DUNG LUONG BU
****

Nut -	Dien ap nut (kV)	Qbu (MVar)	Suat von dau tu (ng.d/ kVar)	Von dau tu tong (tr.d)
9	0.40	0.500	500.0	25.0
10	0.40	0.000	500.0	0.0

* Tong dung luong bu toan luoi: 0.050 MVar
* Ton that cong suat truoc bu: 0.027 MWh
* Ton that cong suat sau bu: 0.025 MWh
* Thoi gian ton that CS: 4000 h
* Ton that dien nang giam: 8.000 MWh/nam
* Gia ban dien binh quan: 2100 d/kWh
* Tong von dau tu: 25.000 tr.dong
* Thoi gian thu hoi von: 1.49 nam

Nhận thấy dung lượng bù tổng 50kVAr có hiệu quả bù tốt nhất là toàn bộ đặt tại vị trí nút 9 với 50kVAr và dung lượng bù cho nút 10 là 0kVAr. Khi đó các chỉ tiêu kinh tế - kỹ thuật như sau: tổn thất công suất trong lưới giảm 2MWh, tổn thất điện năng giảm 8000MWh/năm, tổng vốn đầu tư cho việc bù tại nút 9 là 25 triệu đồng, thời gian thu hồi vốn đầu tư cần thiết theo tính toán là cần 1,49 năm.

Trong quá trình vận hành, công suất tải tại vị trí các nút thay đổi theo thời gian (0h - 24h) với mức tải giả định là 30%, 70%, 100% công suất cực đại (Bảng 3). Mặc dù đã xác định được vị trí nút có hiệu quả bù cao nhất theo suất giảm chi phí tổn thất của thiết bị bù là nút 9, cần phải tính toán được dung lượng bù hợp lý khi tải biến động. Đối với sơ đồ nghiên cứu, tiến hành bù tại nút 9 với dung lượng bù theo từng nấc bù là 0, 10, 20, 30, 40, 50kVAr; kết quả tổn thất công suất trong lưới được tổng hợp trong bảng sau:

Bảng 4. Tổn thất công suất phụ thuộc tải

Q_{b9}, kVAr	Tổn thất công suất, kW		
	Tải 30%	Tải 70%	Tải 100%
0	17	22	27
10	18	23	33
20	18	15	27
30	12	22	27
40	18	21	27
50	18	21	20

Qua bảng kết quả tính tổn thất công suất nhận thấy: khi phụ tải làm việc với tỷ lệ 30%, 70%, 100% tải cực đại thì tổn thất công suất cực tiểu ở mức bù Q_{b9} = 30kVAr, 15kVAr, 20kVAr tương ứng. Từ biểu thức tính tổn thất điện năng, ta xác định tổn thất điện năng trước khi bù: $\Delta A_1 = 17*8+22*8+27*4+22*4 = 508$ (kWh/ngày) và tổn thất điện năng sau khi bù: $\Delta A = 12*8+15*8+20*4+15*4 = 356$ (kWh/ngày).

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Chênh lệch tổn thất điện năng sau khi đặt thiết bị bù: $\delta A = \Delta A_1 - \Delta A_2 = 508 - 356 = 152$ (kWh/ngày).

Như vậy, sau khi bù công suất tác dụng theo dạng bậc thang thì ta giảm được đáng kể tổn thất công suất và tổn thất điện năng, ví dụ với sơ đồ nghiên cứu giảm tổn thất điện năng được 152 kWh/ngày, giảm gần 30% so với khi không tiến hành đặt bù. Đối với sơ đồ lưới điện trung áp nghiên cứu, khi chỉ đặt bù tại vị trí phường Quang Trung 17 (nút số 9 trên Hình 4) thì công suất đặt của thiết bị bù để đạt được tổn thất công suất trong lưới nhỏ nhất như sau:

+ Từ 0h đến 8h, thiết bị bù vận hành ở nấc Q_b = 30kVAr.

+ Từ 8h đến 16h, tải tăng lên, chuyển thiết bị bù vận hành ở nấc Q_b = 20kVAr.

+ Từ 16h đến 20h, tải tăng lên chuyển vận hành thiết bị bù ở nấc Q_b = 50kVAr.

+ Từ 20h đến 24h, tải giảm đi, cần chuyển nấc bù với Q_b = 20kVAr.

3.3. Cài đặt điều khiển tối ưu bằng hệ thống Ripple Control

Các bước thực hiện điều khiển đóng-cắt dung lượng bù tại các nút tải hạ áp sử dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng nhằm giảm tổn thất điện năng trong lưới trung áp như sau:

B1: Thu thập thông tin về công suất tải hạ áp theo thời gian thực tế [2].

B2: Xác định vị trí có hiệu quả bù cao nhất và dung lượng bù tối ưu bằng thuật toán ở trên sử dụng phần mềm CONUS [3].

B3: Điều chỉnh dung lượng bù theo thời gian sử dụng hệ thống RC.

B4: Lặp lại quy trình trên cho các khoảng thời gian trong ngày (0h-24h).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tập trung nghiên cứu bài toán tìm vị trí và dung lượng bù tốt nhất của thiết bị bù trong lưới trung áp. Chỉ tiêu suất giảm chi phí tổn thất và thời gian thu hồi vốn đầu tư được xác định để đánh giá hiệu quả bù công suất phản kháng. Khi thu thập được số liệu cấu trúc các phần tử của mạng lưới điện, phụ tải biến thiên theo thời gian thực sẽ xác định được dung lượng bù hợp lý nhất. Qua những kết quả tích cực mang lại được trích xuất từ mô hình nghiên cứu, kiến nghị ứng dụng hệ thống điều khiển phụ tải bằng sóng RC để đóng cắt dung lượng bù nhằm giảm tổn thất điện năng trong lưới trung áp. ❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**
Ngày phản biện: **21/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bùi Anh Tuấn (2022), "*Nâng cao chất lượng điện áp tại các phụ tải ngành công nghiệp bằng hệ thống phân tán điều khiển tập trung đối với thiết bị bù trơn công suất phản kháng*". Tạp chí Khoa học Khoa học và Công nghệ, tập 58, số 4, trang 22-28.

[2]. Đào Xuân Tiến, Nguyễn Thị Huyền Thanh, Nguyễn Xuân Trường (2024), "*Nghiên cứu, thiết kế hệ thống điều khiển giám sát phụ tải điện từ xa phục vụ quản lý nhu cầu điện*". Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam, tập 22, số 6, trang 778-788.

[3]. Lã Văn Út (2010), "*Hướng dẫn sử dụng chương trình tính toán phân tích chế độ xác lập của hệ thống điện CONUS*". Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, trang 1-62.

[4]. Nguyễn Anh Minh, Trần Anh Tùng (2019), "*Giảm tổn thất công suất cho xuất tuyến trung thế bằng biện pháp bù công suất phản kháng theo đồ thị phụ tải ngày sử dụng thuật toán di truyền*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ năng lượng – Trường Đại học Điện Lực, số 20, trang 66-72.

[5]. Nguyễn Thanh Hiền (2023), "*Phân tích các thông số tải và tụ bù trên mô hình tụ bù Mikro PFR96 trong giảng dạy*". Tạp chí Công Thương, số 23 tháng 10 năm 2023.

[6]. Nguyễn Văn Minh, Bạch Quốc Khánh (2017), "*Tối ưu vị trí và dung lượng tụ bù trong lưới phân phối mẫu 16 nút sử dụng thuật toán di truyền để giảm tổn thất điện năng*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ, số 42, trang 20-24.

[7]. Phan Văn Khải (2003), "*Bù công suất phản kháng lưới cung cấp và phân phối điện*". NXB. Khoa học và kỹ thuật.

[8]. Triệu Quốc Huy (2023), "Nghiên cứu giải pháp bù công suất phản kháng tại các trạm biến áp 110/22kV tỉnh Trà Vinh". Tạp chí Công Thương, số 18 tháng 8 năm 2023.

[9]. Mahela O.P., Goyal D.M. L. (2012), "*Optimal capacitor placement techniques in transmission and distribution networks to reduce line losses and voltage stability enhancement: A review*". O. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), Vol. 3, Iss. 4, Pp. 01-08, Nov. – Dec.

TÍCH HỢP PHƯƠNG PHÁP ENTROPY VÀ PHƯƠNG PHÁP RAM (PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ GỐC) ĐỂ TỐI ƯU ĐA MỤC TIÊU QUÁ TRÌNH MÀI THÉP SKD11

INTEGRATION OF ENTROPY METHOD AND RAM METHOD (ORIGINAL ASSESSMENT METHOD) FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF SKD11 STEEL GRINDING PROCESS

Đỗ Thị Kim Liên*, Nguyễn Duy Chiến
Khoa Cơ khí Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp Việt Hung
**Email: kimlien.viu@gmail.com*

TÓM TẮT

Mài là một phương pháp thường được dùng để gia công những sản phẩm yêu cầu độ chính xác cao trong ngành gia công cơ khí. Nghiên cứu này thực hiện việc tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép SKD11 trên máy mài phẳng. Một quá trình thí nghiệm với tổng số 9 thí nghiệm được thiết kế bằng phương pháp Taguchi đã được thực hiện. Tại mỗi thí nghiệm giá trị ba thông số cắt đã được thay đổi gồm vận tốc chi tiết, lượng chạy dao và chiều sâu cắt. Cũng tại mỗi thí nghiệm đã tiến hành đo lường bốn mục tiêu còn gọi là bốn tiêu chí gồm nhám bề mặt (Ra), thành phần lực cắt theo phương x (Fx), thành phần lực cắt theo phương y (Fy), và thành phần lực cắt theo phương z (Fz). Phương pháp ENTROPY đã được sử dụng để tính trọng số cho các tiêu chí, trong khi đó phương pháp RAM đã được sử dụng để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu. Kết quả đã nhận được giá trị tối ưu của vận tốc chi tiết, lượng chạy dao và chiều sâu cắt tương ứng bằng 10 (m/min), 4 (mm/hành trình) và 0.01 (mm). Ứng với những giá trị tối ưu của các thông số cắt đã nhận được giá trị của các mục tiêu Ra, Fx, Fy và Fz tương ứng bằng 0.49 (μm), 18.4 (N), 15.2 (N), và 28.4 (N).

Từ khóa: *Mài phẳng; Thép SKD11; Tối ưu đa mục tiêu; Phương pháp MEREC; Phương pháp RAM.*

ABSTRACT

Grinding is commonly used in mechanical processing to process products requiring high precision. This study performed multi-objective optimization of the grinding process of SKD11 steel on a flat grinding machine. An experimental process with a total of 9 experiments designed using the Taguchi method was carried out. In each experiment, the values of three cutting parameters were changed, including workpiece speed, feed rate, and depth of cut. Also in each experiment, four objectives, also known as four criteria, were measured, including surface roughness (Ra), cutting force component in the x direction (Fx), cutting force component in the y direction (Fy), and cutting force component in the z direction (Fz). The ENTROPY method was used to calculate the weights for the criteria, while the RAM method was used to solve the multi-objective optimization problem. The

results obtained the optimal values of the workpiece speed, feed rate, and cutting depth, respectively equal to 10 (m/min), 4 (mm/stroke), and 0.01 (mm). Corresponding to the optimal values of the cutting parameters, the values of the targets Ra, Fx, Fy, and Fz, respectively, are equal to 0.49 (m), 18.4 (N), 15.2 (N), and 28.4 (N).

Keywords: *Flat grinding; SKD11 steel; Multi-objective optimization; MEREC method; RAM method.*

1. GIỚI THIỆU

Mài là một phương pháp gia công rất phổ biến trong sản xuất cơ khí [1]. Phương pháp này thường dùng để gia công những sản phẩm yêu cầu cao về độ chính xác [2]. Để tận dụng tối đa những ưu điểm của phương pháp mài, việc nghiên cứu tối ưu quá trình mài là cần thiết phải được thực hiện [3]. Rất nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài nhằm đảm bảo đồng thời nhiều thông số của quá trình mài đạt được giá trị mong muốn. Trong các nghiên cứu đã công bố cũng cho thấy các nhà khoa học đã áp dụng nhiều thuật toán khác nhau để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu cũng như đã áp dụng nhiều phương pháp khác nhau để tính trọng số cho các mục tiêu. Trong phạm vi của bài viết này không thể tóm tắt hết các nghiên cứu đã công bố mà chỉ xem xét đến một số nghiên cứu thuộc chủ đề này được công bố trong thời gian gần đây.

Thuật toán Nead-Mean được tích hợp trong phần mềm DESIGN EXPERT V7.1.3 đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép EN-8 nhằm đảm bảo đồng thời nhám bề mặt nhỏ nhất và năng suất loại bỏ vật liệu lớn nhất, ở đây trọng số của hai tiêu chí nhám bề mặt và năng suất loại bỏ vật liệu đã được chọn bằng nhau, tức là bằng 0.5 [4]. Trong [5], thuật toán DEAR cũng đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép SAE420, ở đây mục tiêu cần tối ưu là nhằm đảm bảo đồng thời nhám bề mặt và rung động của trục chính máy mài theo ba phương x, y, z cùng có giá trị nhỏ nhất, trong nghiên cứu này trọng số của các mục tiêu cũng đã được tính bằng chính thuật toán DEAR. Hai thuật toán MOORA và COPRAS đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép SKD11 nhằm đảm bảo đồng thời nhám bề mặt có giá trị nhỏ nhất và năng suất loại bỏ vật liệu có giá trị lớn nhất, ở đây trọng số của hai tiêu chí này đã được tính bằng phương pháp Entropy [6]. Thuật toán GA đã được sử dụng để tối ưu quá trình mài vật liệu pinus sylvestris nhằm đảm bảo nhám bề mặt có giá trị nhỏ nhất [7]. Thuật toán GA cũng đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép SKD11, ở đây trọng số của ba mục tiêu gồm nhám bề mặt, thời gian mài và độ lệch giữa độ sâu mài thực tế và độ sâu mài mong muốn đã được chọn bằng nhau, tức là bằng 1/3 [8]. Thuật toán DEAR đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép AISI 4140 nhằm đảm bảo đồng thời nhám bề mặt có giá trị nhỏ và năng suất loại bỏ vật liệu có giá trị lớn, ở đây trọng số của các mục tiêu đã được tính bằng chính thuật toán DEAR [9]. Thuật toán TOPSIS đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép DIN 1.2379 nhằm đảm bảo đồng thời nhám bề mặt, rung động của trục chính máy mài theo ba phương x, y, z có giá trị nhỏ nhất và năng suất loại bỏ vật liệu có giá trị lớn nhất, ở đây trọng số của các mục tiêu cũng đã được chọn bằng nhau, tức là bằng 0.2 [10]. Trong [11], thuật toán Nead-Mean cũng đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép Hardox 500 nhằm đảm bảo đồng thời ☞

nhám bề mặt có giá trị nhỏ nhất và năng suất loại bỏ vật liệu có giá trị lớn nhất, ở đây trọng số của hai tiêu chí này cũng đã được chọn bằng nhau. Thuật toán PSO đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép dụng cụ D2 nhằm đảm bảo đồng thời năng suất loại bỏ vật liệu lớn nhất và sai số kích thước nhỏ nhất, ở đây trọng số của hai thông số này không được định nghĩa rõ ràng [12].

Việc tóm tắt ngắn gọn một số nghiên cứu ở trên cho thấy có nhiều thuật toán và các phương pháp tính trọng số khác nhau đã được sử dụng để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài. Tuy nhiên, dường như chưa có tài liệu nào tích hợp việc tính trọng số cho các tiêu chí bằng phương pháp ENTROPY và thuật toán RAM để tối ưu đa mục tiêu quá trình mài. Khoảng trống này đã thúc đẩy nghiên cứu này được thực hiện.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Hệ thống thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm được làm từ thép SKD11 có các kích thước dài, rộng, cao tương ứng là 40 mm, 25 mm và 8 mm. Thành phần hóa học một số nguyên tố chính của loại thép này được tổng hợp trong bảng 1. Máy mài phẳng có ký hiệu APSG-820/8A do Đài Loan sản xuất đã được sử dụng để thực hiện các thí nghiệm. Nhám bề mặt đã được đo bằng máy đo độ nhám có ký hiệu SJ-201 do Nhật Bản sản xuất. Các thành phần lực đã được đo bằng lực kế của hãng KISTLER do Đức sản xuất. Để giảm ảnh hưởng của sai số ngẫu nhiên đến kết quả của các phép đo, tại mỗi thí nghiệm đã tiến hành đo các thông số phản ứng (nhám bề mặt và các thành phần lực cắt) ít nhất 3 lần, giá trị các phản ứng tại mỗi thí nghiệm là giá trị trung bình của các lần đo liên tiếp.

Bảng 1. Các thành phần hoá học của thép SKD11

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
1.03	0.23	0.31	0.022	0.022	11.71	0.18	0.92

2.2. Ma trận thí nghiệm

Trong quá trình thí nghiệm, tại mỗi thí nghiệm đã được thay đổi ba thông số gồm vận tốc chi tiết, lượng dạy dao, và chiều sâu cắt. Đây là ba thông số sẽ dễ dàng được điều chỉnh bởi người thợ vận hành máy [13]. Trong quá trình thí nghiệm, mỗi thông số cắt sẽ thay đổi 3 mức giá trị tương ứng với các mức mã hóa 1, 2 và 3, như trong bảng 2. Các giá trị trong bảng 2 được chọn trên cơ sở tham khảo các tài liệu liên quan và dựa vào khả năng công nghệ của máy thí nghiệm được sử dụng [13].

Ma trận thí nghiệm đã được xây dựng theo dạng Taguchi gồm 9 thí nghiệm như trong bảng 3. Đây là dạng thí nghiệm được sử dụng phổ biến khi tiến hành thí nghiệm tối ưu hóa và đã được sử dụng nhiều trong lĩnh vực cơ khí ở thời gian gần đây [13].

Bảng 2. Các thông số đầu vào

Thông số	Đơn vị	Ký hiệu	Giá trị tại các mức		
			1	2	3
Vận tốc phôi	m/min	v	5	10	15
Lượng chạy dao	mm/hành trình	f	4	6	8
Chiều sâu cắt	mm	t	0.005	0.01	0.015

Bảng 3. Ma trận thí nghiệm

Thí nghiệm	Giá trị mã hóa			Giá trị thật		
	v	f	t	v (m/min)	f (mm/hành trình)	t (mm)
#1	1	1	1	5	4	0.005
#2	1	2	2	5	6	0.01
#3	1	3	3	5	8	0.015
#4	2	1	2	10	4	0.01
#5	2	2	3	10	6	0.015
#6	2	3	1	10	8	0.005
#7	3	1	3	15	4	0.015
#8	3	2	1	15	6	0.005
#9	3	3	2	15	8	0.01

2.3. Kết quả thí nghiệm

Thực hiện các thí nghiệm theo thứ tự của chúng trong bảng 3, các đại lượng Ra, Fx, Fy và Fz đã được đo trong mỗi thí nghiệm. Trong bảng 4 đã tổng hợp kết quả của các thí nghiệm đã thực hiện.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm

Exp.	Thông số đầu vào				Đầu ra		
	v (m/min)	f (mm/stroke)	t (mm)	Ra (µm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
#1	5	4	0.005	0.82	21.7	11.3	27.1
#2	5	6	0.01	0.62	34.5	20.5	24.3
#3	5	8	0.015	0.75	39.4	16.4	26.2
#4	10	4	0.01	0.49	18.4	15.2	28.4
#5	10	6	0.015	0.51	22.5	20.6	30.4
#6	10	8	0.005	0.41	29.6	19.8	31.2
#7	15	4	0.015	0.94	31.7	22.7	22.8
#8	15	6	0.005	0.82	32.7	28.6	30.6
#9	15	8	0.01	0.73	28.1	18.4	31.5

Từ số liệu trong bảng 4 cho thấy Ra có giá trị nhỏ nhất bằng 0.41 (μm) tại thí nghiệm #6, Fx nhỏ nhất bằng 18.4 (N) tại thí nghiệm #4, Fy nhỏ nhất bằng 11.3 (N) tại thí nghiệm #1, còn Fz có giá trị nhỏ nhất bằng 22.8 (N) tại thí nghiệm #7. Như vậy rõ ràng không tồn tại bất kỳ một phương án (thí nghiệm) nào mà đảm bảo đồng thời cả Ra, Fx, Fy và Fz cùng đạt giá trị nhỏ nhất. Thay vào đó, ta chỉ có thể xác định được một phương án mà cả bốn tiêu chí này đều được coi là "nhỏ nhất". Dĩ nhiên, việc làm đó cũng không thể thực hiện được nếu chỉ dừng lại ở việc quan sát số liệu trong bảng 4 mà phải thực hiện xếp hạng các phương án để chọn được phương án tốt nhất. Vì lý do này, thuật toán RAM sẽ được sử dụng để xếp hạng các phương án trong nghiên cứu này, nhưng trước hết cần tính trọng số cho các tiêu chí bằng phương pháp ENTROPY.

2.4. Phương pháp Entropy

Giả sử có m thí nghiệm đã thực hiện, tại mỗi thí nghiệm đã đo lường n thông số đầu ra, gọi x_{ij} là giá trị của thông số đầu ra thứ j tại thí nghiệm thứ i, với j bằng 1 đến n và i bằng 1 đến m, việc tính trọng số cho các thông số j bằng phương pháp Entropy được thực hiện theo trình tự sau [14].

Bước 1: Xác định giá trị chuẩn hóa cho các tiêu chí theo công thức (1).

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{m + \sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2} \quad (1)$$

Bước 2: Tính giá trị của độ đo Entropy cho mỗi thông số j theo công thức (2).

$$e_j = \sum_{i=1}^{m} [n_{ij} \times ln(n_{ij})] - \left(1 - \sum_{i=1}^{m} n_{ij}\right) \times ln\left(1 - \sum_{i=1}^{m} n_{ij}\right) \quad (2)$$

Bước 3: Tính trọng số cho mỗi thông số theo công thức (3).

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1 - e_j)} \quad (3)$$

2.5. Thuật toán RAM

Các bước để sử dụng phương pháp RAM để xếp hạng các phương án như sau RAM [15]:

Bước 1: Tương tự bước 1 của phương pháp ENTROPY.

Bước 2: Chuẩn hóa số liệu theo công thức (4).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad (4)$$

Bước 3: Tính các giá trị chuẩn hóa có xét đến trọng số của các tiêu chí theo (5).

$$y_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (5)$$

Trong đó, w_j là trọng số của tiêu chí thứ j.

Bước 4: Tính tổng điểm chuẩn hóa có xét đến trọng số của các tiêu chí theo (6) và (7). Các chữ cái B và C được sử dụng để ký hiệu tương ứng cho tiêu chí lợi nhuận và tiêu chí chi phí.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^{n} y_{+ij} \quad \text{if } j \in B \quad (6)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^{n} y_{-ij} \quad \text{if } j \in C \quad (7)$$

Bước 5: Tính điểm của từng phương án theo (8).

$$RI_i = \sqrt[2+S_{-i}]{2 + S_{+i}} \quad (8)$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Bước 6: Xếp hạng các phương án theo thứ tự giảm dần điểm số của chúng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Áp dụng công thức từ (1) đến (3) đã tính được trọng số của các thông số Ra, Fx, Fy và Fz tương ứng là 0.364, 0.208, 0.218, và 0.210.

Áp dụng các công thức từ (4) đến (8) đã tính được điểm số RIi của từng thí nghiệm như đã tổng hợp trong bảng 5. Trong cột cuối cùng của bảng này cũng đã thể hiện thứ hạng của các thí nghiệm theo điểm số của nó.

Bảng 5. Điểm số và thứ hạng của các thí nghiệm

Thí nghiệm	Ra (μm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	RIi	Xếp hạng
#1	0.82	21.7	11.3	27.1	1.390	4
#2	0.62	34.5	20.5	24.3	1.389	5
#3	0.75	39.4	16.4	26.2	1.387	7
#4	0.49	18.4	15.2	28.4	1.394	1
#5	0.51	22.5	20.6	30.4	1.391	3
#6	0.41	29.6	19.8	31.2	1.391	2
#7	0.94	31.7	22.7	22.8	1.385	8
#8	0.82	32.7	28.6	30.6	1.383	9
#9	0.73	28.1	18.4	31.5	1.388	6

Như vậy, kết quả tính toán đã xác định thí nghiệm #4 là tốt nhất trong số các thí nghiệm đã thực hiện. Theo đó, giá trị tối ưu của vận tốc chi tiết, lượng chạy dao và chiều sâu cắt tương ứng là 10 (m/min), 4 (mm/stroke) và 0.01 (mm). Khi mài với những giá trị tối ưu của chế độ cắt này thì giá trị của các tiêu chí Ra, Fx, Fy và Fz tương ứng bằng 0.49 (μm), 18.4 (N), 15.2 (N), và 28.4 (N).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện việc tối ưu đa mục tiêu quá trình mài thép SKD11. Thuật toán RAM và phương pháp trọng số Entropy lần được tiên được kết hợp để giải bài toán tối ưu quá trình mài phẳng trong nghiên cứu này. Khi sử dụng phương pháp Entropy đã tính được trọng số của các chỉ tiêu Ra, Fx, Fy và Fz tương ứng bằng 0.364, 0.208, 0.218, và 0.210. Sử dụng thuật toán RAM đã xác định được giá trị tối ưu của vận tốc chi tiết bằng 10 (m/min), của lượng chạy dao bằng 4 (mm/hành trình) và của chiều sâu cắt bằng 0.01 (mm). Ứng với những giá trị tối ưu này của các thông số cắt thì nhám bề mặt (Ra) và các thành phần lực Fx, Fy, Fz tương ứng bằng 0.49 (μm), 18.4 (N), 15.2 (N), và 28.4 (N).❖

Ngày nhận bài: **09/5/2025**
Ngày phản biện: **26/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. X. Li, Z. Tang, C. Chen, L. Wang, Y. Zhang, D. Wang, "*An optimization method of grinding wheel profile for complex large shaft curve grinding*". Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, vol. 5, no. 2, Art. no. 2025008, 2025.

[2]. A. Heininen, S. Santa-aho, J. Röttger, P. Julkunen, K. T. Koskinen, "*Grinding optimization using nondestructive testing (NDT) and empirical models*". Machining Science and Technology, vol. 28, no. 1, pp. 98-118, 2024.

[3]. M. M. Salem, S. S. Mohamed, A. A. Ibrahim, "*Optimization of surface grinding parameters used in improved surface Integrity*". Research Square, pp. 1-14, 2022.

[4]. B. Dasthagiri, D. E. V. G. Goud, "*Optimization Studies on Surface Grinding Process Parameters*". International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, vol. 4, no. 7, pp. 6148-6156, 2015.

[5]. D. D. Trung, N. -T. Nguyen, D. H. Tien, H. L. Dang, "*A research on multi-objective optimization of the grinding process using segmented grinding wheel by TAGUCHI-DEAR method*. Eureka: Physics and Engineering, vol. 2021, no. 1, pp. 67-77, 2021.

[6]. N. –T. Nguyen, D. D. Trung, "*Combination of taguchi method, MOORA and COPRAS techniques in multi-objective optimization of surface grinding process*". Journal of Applied Engineering Science, vol. 19, no. 2, pp. 390-398, 2021.

[7]. A. Gürgen, A. Çakmak, S. Yıldız, A. Malkoçoğlu, "*Optimization of cnc operating parameters to minimize surface roughness of pinus sylvestris using integrated artificial neural network and genetic algorithm*". Maderas Ciencia y tecnología, vol. 24, no. 1, pp. 1-12, 2022.

[8]. V. Nguyen, D. Nguyen, D. Do, T. Tra, "*Multi-Objective Optimization of the Surface Grinding Process for Heat-Treated Steel*". International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, vol. 21, no. 4, pp. 11831-11843, 2024.

[9]. D. D. Trung, H. X. Thinh, L. D. Ha, "*Improving the efficiency of grinding process using the rubber-pasted grinding wheel*". Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering, vol. 72, no. 1, pp. 23-34, 2022.

[10]. D.D. Trung, N.V. Thien, N.-T. Nguyen, "*Application of TOPSIS Method in Multi-Objective Optimization of the Grinding Process Using Segmented Grinding Wheel*". Tribology in Industry, vol. 43, no. 1, pp. 12-22, 2021.

[11]. T. H. Danh, L. H. Ky, "*Optimization of Wheel Dressing Technological Parameters when Grinding Hardox 500 Steel*". Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 14, no. 4, pp. 15854-15859, 2024.

[12]. Z. Chen, X. Li, Z. Zhu, Z. Zhao, L. Wang, S. Jiang, Y. Rong, "*The optimization of accuracy and efficiency for multistage precision grinding process with an improved particle swarm optimization algorithm*". Intelligent Manufacturing and Robotics-Research Article, pp. 1-13, 2020.

[13]. N. –T. Nguyen, D. D. Trung, "*A study on the surface grinding process of the SUJ2 steel using CBN slotted grinding wheel*". AIMS Materials Science, vol. 7, no. 6, pp. 871-886, 2020.

[14]. D. D. Trung, "*A combination method for multi-criteria decision making problem in turning process*". Manufacturing review, vol. 8, Art. no. 26, 2021.

[15]. A. Sotoudeh-Anvari, "*Root Assessment Method (RAM): A novel multi-criteria decision making method and its applications in sustainability challenges*". Journal of Cleaner Production, vol. 423, Art. No. 138695, 2023.

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG PHƯƠNG PHÁP BỔ SUNG LƯỢNG BÙ DO BIẾN DẠNG ĐÀN HỒI CHO THUẬT TOÁN XÁC ĐỊNH LƯỢNG BÙ SAI SỐ VỊ TRÍ CỦA VÍT ME – ĐAI ỐC BI

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF METHOD OF ADDING ELASTIC DEFORMATION COMPENSATION TO THE ALGORITHM FOR DETERMINING POSITIONAL ERROR COMPENSATION OF BALLSCREWS

Trần Đức Toàn
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: toan.tranduc@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Vít me – đai ốc bi được coi là lựa chọn ưu tiên hàng đầu khi cần cơ cấu dẫn động cho chuyển động tịnh tiến chính xác cao. Khi chịu tải, chi tiết máy sẽ xảy ra biến dạng đàn hồi, gây sai số vị trí các bề mặt, và lượng biến dạng này sẽ thay đổi khi đặc trưng của tải thay đổi. Nhiều hãng sản xuất vít me – đai ốc bi công bố thông tin phục vụ xác định biến dạng đàn hồi trong bộ truyền này ở mức hạn chế, thông tin chưa đầy đủ [1], thậm chí chỉ công bố sai số giới hạn cố định [2, 3]. Gây khó khăn cho việc tìm hiểu, và tiến tới làm chủ công nghệ, chủ động hoàn toàn trong việc thiết kế, chế tạo sản phẩm công nghiệp có độ chính xác cao, điều khiển tự động. Trên cơ sở nghiên cứu biến dạng đàn hồi, tác giả đã đề xuất bổ sung lượng biến dạng đàn hồi mà các nghiên cứu trước đây chưa tính đến vào trong chương trình tính toán điều khiển lượng bù các sai số vị trí của đai ốc/ bàn máy cho hệ thống điều khiển máy công cụ CNC, góp phần cải thiện và nâng cao độ chính xác gia công.

Từ khóa: *Vít me – đai ốc bi; Bù biến dạng đàn hồi; Máy CNC.*

ABSTRACT

Ball screws are considered the first choice when a drive mechanism for high precision linear motion is required. When be loaded, the machine part will undergo elastic deformation, causing position errors on the surfaces, and the amount of this deformation will change when the load characteristics change. Many manufacturers of ball screws publish information to determine the elastic deformation in this transmission at a limited level, with incomplete information [1], and even only publish fixed limit errors [2, 3]. Making it difficult to learn, and master the technology, and be completely proactive in designing and manufacturing high-precision, automatic-controlled industrial products. Based on the study of elastic deformation, the author proposed to add the amount of elastic deformation that previous studies had not taken into account into the program to calculate the control of the amount of compensation for position errors of nuts/machine tables for the CNC machine tool control system, contributing to improving and enhancing the machining accuracy.

Keywords: *Ballscrews; Elastic deformation compensation; CNC machine.*

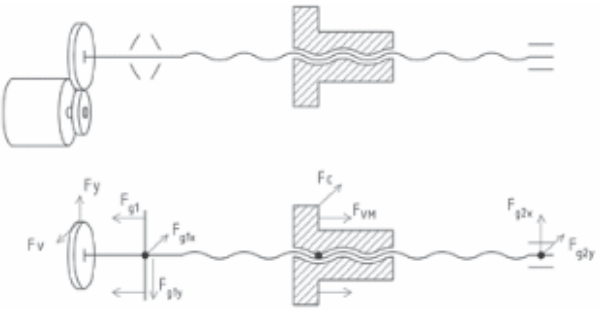
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi hệ thống đo và phản hồi của máy CNC sử dụng Rotary encoder lấy tín hiệu từ trục quay để xác định vị trí thì giá trị sai số do biến dạng đàn hồi là rất lớn. Muốn điều khiển chính xác vị trí của máy/thiết bị, hệ thống điều khiển bắt buộc phải tính toán và bù lượng biến dạng đàn hồi này. Trên cơ sở nghiên cứu các quá trình kỹ thuật xảy ra, cùng các nghiên cứu trước đây về bù sai số cho vít me – đai ốc bi máy CNC nhằm đảm bảo điều khiển chính xác vị trí cho đai ốc [4, 5, 6], tác giả nghiên cứu sửa đổi và bổ sung cho thuật toán tính bù sai số do biến dạng đàn hồi cho lệnh điều khiển vị trí vít me – đai ốc bi, làm cơ sở cho việc xây dựng và bổ sung bộ thông số kỹ thuật cho mỗi bộ vít me – đai ốc bi, nhằm hỗ trợ và nâng cao chất lượng hoạt động, tính toán thông số vị trí cho quá trình điều khiển, cho ra các máy có độ chính xác vị trí làm việc cao, nâng cao chất lượng làm việc của các máy móc/ thiết bị, tự động hóa, công nghiệp hóa sản xuất tại Việt Nam.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Phân tích tải tác động lên vít me và các quá trình vật lý xảy ra, nhận thấy:

Khi làm việc, hệ các lực tác dụng lên vít me được thể hiện trên hình 1.

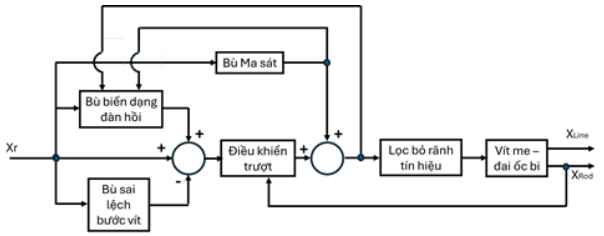


Hình 1. Mô tả các lực tác dụng lên vít me khi làm việc

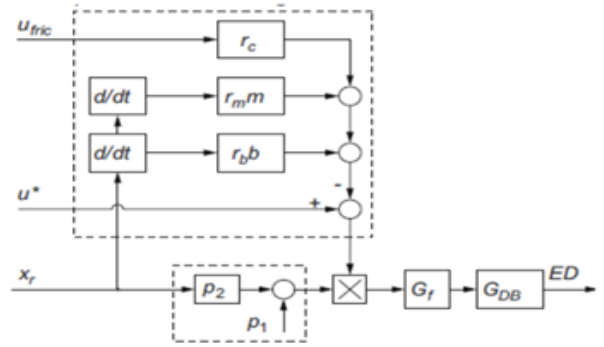
Theo đó, điểm bắt đầu được coi là điểm động cơ bắt đầu nhận lệnh chuyển động quay, khi đó cơ hệ không chịu tải, các kích thước ở trạng thái tự nhiên. Điểm kết thúc chuyển động là tại điểm mục tiêu mong muốn B. Các quá trình xảy ra như sau: Động cơ quay, vít me chịu tải tăng dần và biến dạng đàn hồi, lượng biến dạng sẽ tăng dần ở giai đoạn ma sát nghỉ, ngay khi đai ốc bắt đầu dịch chuyển, thì lượng biến dạng này sẽ thay đổi đột ngột (nhảy cóc, do chuyển đổi trạng thái ma sát nghỉ về trạng thái ma sát khi chuyển động) và lại tăng theo vị trí đai ốc khi di chuyển. Sau đó, khi dao bắt đầu tiếp xúc với phôi, lượng biến dạng này lại tăng lên đột ngột do lực cắt, và tiếp tục tăng ổn định nếu lực cắt ổn định (do vị trí làm việc của đai ốc trên vít me thay đổi), đến khi nhận lệnh dừng bàn máy, vít me đàn hồi tiếp theo hướng chuyển động để trở về kích thước tự nhiên.

Với các quá trình xảy ra, lượng biến dạng đàn hồi trục vít me do kéo nén – ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác vị trí đai ốc cũng chính là độ chính xác gia công – là rất lớn. Có thể ví dụ khi gia công tiện phôi thép C45 với lực cắt khoảng 3000 (N), với vật liệu vít me như công bố, vị trí đai ốc dẫn động bàn máy làm việc cách gối đỡ chặn 300 mm, tính được lượng biến dạng đàn hồi của vít me là $\Delta l = 45$ μm - với gia công chính xác cao thì lượng sai số này không thể bỏ qua.

Một số nhà khoa học đã thực hiện các công trình nghiên cứu về biến dạng đàn hồi và một số nguyên nhân gây sai số điều khiển vị trí của hệ thống điều khiển máy CNC [4, 5]. Theo đó, A Kalalzdeh và cộng sự đưa ra sơ đồ điều khiển bù như sau:



Hình 2. Sơ đồ điều khiển bù sai số biến dạng đàn hồi trong máy công cụ [4]



Hình 3. Sơ đồ điều khiển bù biến dạng đàn hồi [4]

Trên hình:

u_{fric}: Tín hiệu điều khiển điện về ma sát (V);

r_c: Tỉ lệ phân bố tải theo chu vi;

r_m: Hệ số ma sát;

m: Khối lượng;

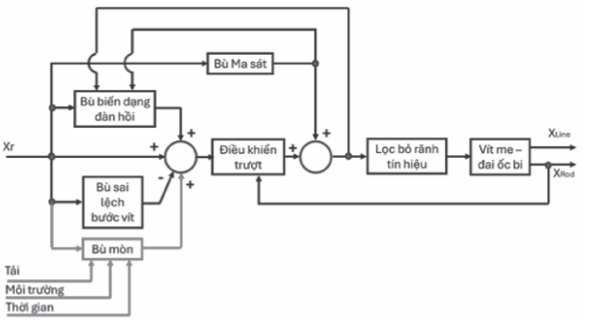
r_b.b: Ma sát khối giảm chấn;

G_{DB} = (0 hoặc 1) bộ lọc tín hiệu.

p_1, p_2: Kí hiệu viết gọn của $\frac{K_{bering+}\,K_{nut}}{K_{bering}.K_{nut}}$ và $\frac{1}{K}$ trong công thức tính độ cứng;

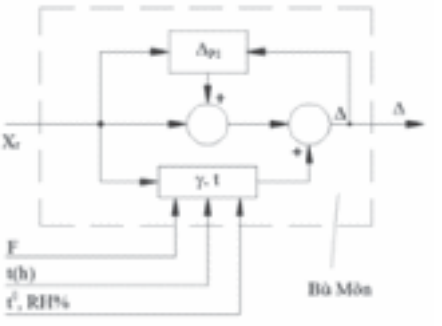
G_f: Giá trị được thêm vào để làm giảm sai số điều khiển.

Bổ sung vào nghiên cứu của [4], nghiên cứu [4] cho rằng cần bù thêm lượng mòn vào quá trình điều khiển. Theo đó, sau mỗi thời gian làm việc nhất định, cần xác định lượng mòn tại từng điểm theo vị trí trên trục vít me, từ đó có dữ liệu bù mòn phù hợp. Sơ đồ tính toán điều khiển bù mòn do [5] đề xuất được mô tả được thể hiện trên hình 4:



Hình 4. Sơ đồ khối tính toán lượng bù sai số vị trí vít me – đai ốc bi [6]

Với cụ thể sơ đồ thuật toán tính mòn được mô tả trên hình 5.

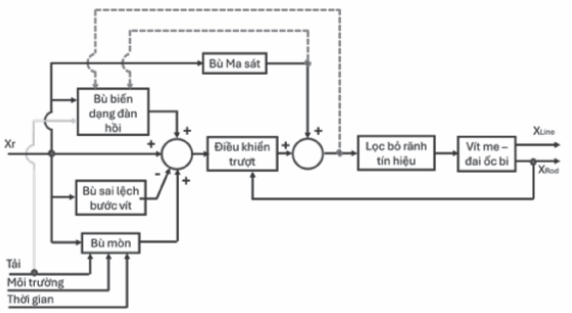


Hình 5. Sơ đồ thuật toán tính mòn [5]

Trong quá trình nghiên cứu về xác định lượng biến dạng đàn hồi, tác giả nhận thấy hệ thống điều khiển xác định lượng bù mòn theo [4] là chưa đầy đủ, do đầu vào quá trình tính bù mòn không có thông tin về tải (không có thông tin về các thông số công nghệ) mà chỉ lấy thông tin qua các phản hồi từ thông số điều khiển kiểu áp đặt để tính lượng bù. [5] thì ngầm công nhận bù biến dạng đàn hồi theo [4] là đúng, nên chỉ bổ sung quá trình tính lượng bù do mòn vào sơ đồ điều khiển. Do đó, rất cần cần bổ sung nghiên cứu sâu hơn để đưa ra kết quả chính xác hơn, giúp điều khiển vị trí chính xác hơn.

Dù có thể tính toán thông tin về tải đặt vào vít me thông qua các thông số khối lượng, ☞

tốc độ, gia tốc và ma sát [4], nhưng theo như chương trình tính toán [4] thì các thông tin này hoàn toàn lấy từ lệnh điều khiển với những tham số áp đặt. Do đó, lấy thông tin từ thông số công nghệ thực tế để tính toán lượng bù biến dạng, tất nhiên sẽ cho độ tin cậy cao hơn. Đề xuất của tác giả về sơ đồ tính toán lượng bù do các nguyên nhân biến dạng đàn hồi, sai lệch bước vít, ma sát, mòn được thể hiện ở hình dưới đây.

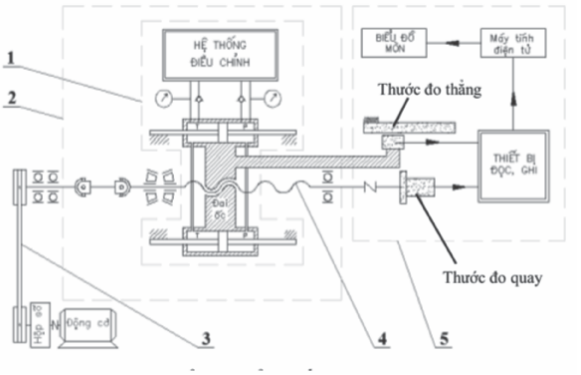


Hình 6. Sơ đồ tính toán sai số vị trí đai ốc

Theo như sơ đồ, đường truyền thông tin được tác giả đề xuất bỏ là đường nét đứt tô đỏ, đường truyền thông tin được đề xuất thêm vào là màu xanh. Sở dĩ bỏ đường truyền màu đỏ vì tất cả thông tin có được chỉ đều xuất phát từ lệnh điều khiển vị trí mong muốn, lệnh này không theo bước và thông số công nghệ, cũng như không phải là biến số; tương tự như vậy, tác giả thêm đường màu xanh thể hiện thông tin bước và thông số công nghệ phải được cập nhật liên tục cùng lệnh điều khiển vị trí tương ứng, và nó là nguyên liệu để tính toán ra trực tiếp tải gây biến dạng, chứ không phải tính tải gây biến dạng gián tiếp qua khối lượng, vận tốc, gia tốc như [4].

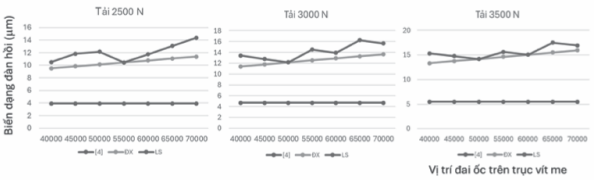
3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Sử dụng thiết bị thử nghiệm và đo mòn vít me – đai ốc bi [5]. Hình dưới thể hiện tổng thể nguyên lý của thiết bị đo này:



Hình 7. Sơ đồ nguyên lý thiết bị thử nghiệm và đo mòn [5]

Sử dụng thiết bị thử nghiệm và đo mòn vít me – đai ốc bi để đo lượng biến dạng đàn hồi thực tế và so sánh với tính toán theo sơ đồ đề xuất, hình dưới thể hiện kết quả đo.



Hình 8. Lượng biến dạng đàn hồi theo nhà sản xuất và thực tế.

Như vậy có thể kết luận: việc tính toán tải thông qua thông số công nghệ đầu vào tại mỗi bước công nghệ cho độ tin cậy cao hơn so với việc áp đặt mỗi thông số cố định cho mỗi vị trí đai ốc vít me do hình dạng đồ thị lượng biến dạng đàn hồi là phù hợp và sát với lý thuyết về sự biến dạng đàn hồi.

Nghiên cứu thay đổi tham số điều khiển và can thiệp vào chương trình điều khiển của một máy CNC công nghiệp có sẵn, và hơn nữa là thử nghiệm trên các máy CNC của các hãng sản xuất khác nhau là rất khó đạt được sự chấp thuận và rất tốn kém. Do vậy, nghiên cứu mới chỉ dừng ở việc là nghiên cứu lý thuyết và thử nghiệm đơn lẻ, ngẫu nhiên cho một chủng loại

vít me của một hãng được lựa chọn ngẫu nhiên. Kết quả của nghiên cứu chắc chắn chưa thể áp dụng tổng quát và đại trà cho mọi chủng loại vít me của mọi hãng bất kỳ. Đây là thiếu sót của nghiên cứu này. Nhưng đóng góp của nghiên cứu là đã chỉ ra việc lấy thông tin từ lệnh điều khiển vị trí, tốc độ, gia tốc, khối lượng để gián tiếp tính ngược ra tải gây biến dạng đàn hồi, hoặc chỉ đưa ra thông số biến dạng đàn hồi lớn nhất, cố định, là phi thực tế, cho độ tin cậy thấp, và cần nghiên cứu, thử nghiệm nhiều hơn nữa để đưa ra một công thức tin cậy để xác định lượng sai số do các nguyên nhân khác nhau.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**
Ngày phản biện: **21/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Hiwin, Ball screws technical information. 2018.
[2]. NSK, Precision Machine Components. 2008.
[3]. Thomson, Ball screws and ball Splines. 2021.
[4]. A. Kamalzadeh, D.J. Gordon, K. Erkorkmaz, "*Robust compensation of elastic deformations in ball screw drives*". International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 50(6), (2010) 559-574.
[5]. Trần Đức Toàn, Phạm Văn Hùng, "*Nghiên cứu ổn định độ chính xác gia công bằng phương pháp bù sai số dịch chuyển do mòn của vít me – đai ốc bi máy CNC*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ các trường đại học kỹ thuật (2016). ISSN 2354 – 1083.

NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ SỬA CHỮA ĐẦU CHỐT NỐI CÁNH TUABIN HƠI NƯỚC THÉP KHÔNG GỈ AISI 422SS BẰNG CÔNG NGHỆ IN 3D LASER BỘT

REPAIR TENON OF STEAM TURBINE BLADE AISI 422 STAINLESS STEEL USING LASER 3D PRINTING METAL POWDER PROCESS

Trần Lâm
Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: lam.tran@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Mục đích của bài báo là nghiên cứu công nghệ sửa chữa đầu nối của cánh tuabin hơi nước bằng quá trình in 3D laser bột thép không gỉ AISI 422 (422 SS) lên cánh tuabin có vật liệu tương tự. Việc phân tích, so sánh cấu trúc tế vi và cơ tính của cả kim loại cơ bản và lớp bột kim loại in trong cả hai trường hợp in một lớp và in nhiều lớp nhằm tìm ra bộ thông số phù hợp cho quá trình hàn in 3D laser bột kim loại. Trong bào báo, các thí nghiệm đo độ bền kéo, độ dai va đập và độ cứng được tiến hành để xác định cơ tính của cả kim loại cơ bản và lớp kim loại in 3D. Các kết quả thí nghiệm cho thấy kích thước hạt của lớp kim loại in 3D nhỏ hơn so với kim loại cơ bản trong cả hai điều kiện ngay sau khi in 3D và sau khi xử lý nhiệt và điều này làm tăng độ cứng lớp kim loại in so với kim loại cơ bản. Với quá trình in laser 3D nhiều lớp, các kết quả thí nghiệm đo độ bền kéo và độ dai va đập của lớp kim loại in sau khi xử lý nhiệt có độ bền kéo cao hơn nhưng độ dai va đập tương đương so với kim loại cơ bản. Sau khi thí nghiệm với các cánh tuabin thử nghiệm khi lắp vào rotor cho thấy các đầu nối sau khi được sửa chữa, phục hồi bằng quá trình in laser 3D bột kim loại nhiều lớp có khả năng chịu tải kéo lớn hơn so với kim loại cơ bản nên hoàn toàn có thể sử dụng công nghệ in 3D laser bột để sửa chữa, phục hồi các cánh tuabin khi đầu chốt nối bị hỏng.

Từ khóa: *AISI 422 SS; In Laser 3D bột kim loại nóng chảy; Cánh tua bin hơi nước; Sửa chữa đầu chốt nối cánh tuabin.*

ABSTRACT

The purpose of this investigation was to study the tenon repairs of steam turbine blade using laser 3D powder fusion process by added AISI 422 stainless steel (SS) powder on a 422 SS used blade. The microstructures analysis, mechanical properties tests of base metal (BM) and printing layer in both single layer and multi-layer processes with various process parameters were analyzed and compared to find out the adequate laser 3D printing metal powder process parameters. In this study, tensile test, impact test and microhardness test were carried out to characterize the mechanical properties of both BM and printed metal layer. Experimental results showed the grain size of printing metal layer was smaller than that of BM either in the as- printed condition and the 700°C/2h tempered condition; these small grains also increased the hardness of printed metal layer.

In the multi-layer laser printing condition, the results of tensile and impact test showed the printed metal layer after 700°C/2h tempering had higher tensile strength than the BM did, while both printed metal layer and BM possess approximately the same impact energy. Experimental results of mock-up trials showed that the repaired tenons, through multi-layer laser 3D printing process, can sustain higher tensile loads than the BM after pinning deformation.

Keywords: *AISI 422 SS; Laser 3D powder fusion; Steam turbine blade; Tenon repair.*

1. TỔNG QUAN

Trong những năm gần đây, việc ứng dụng thép không gỉ martensitic để chế tạo các bộ phận sử dụng trong môi trường ăn mòn và/hoặc nhiệt độ cao, chẳng hạn như ống hơi nhiệt độ cao, cánh tua bin hơi nước, rôto,… đã mang lại kết quả thành công và đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng từ ngành sản xuất điện [1]. Thép không gỉ loại 422 là một biến thể của thép không gỉ martensitic AISI 420 đã được cải tiến với thành phần hóa học được bổ sung Molypden và Wolfram, được thiết kế để có thể hoạt động ở nhiệt độ lên đến 650°C mà vẫn đảm bảo độ bền và độ dai cần thiết. Ứng dụng chủ yếu của loại thép không gỉ này là làm cánh tua bin, van áp suất và các bộ phận kết cấu của máy bay [2].

Trong quá trình kiểm tra định kỳ tại một nhà máy điện hạt nhân, các yếu tố quan trọng nhất gây ra hư hỏng hủy lớn cho cánh tua bin hơi nước là các chốt bị mòn/gãy của cánh tua bin áp suất cao được tán đinh để cố định các vỏ rotor. Do đó, cần phải sửa chữa các chốt bị hỏng hoặc thay thế các chốt mới trước khi đưa tua bin trở lại hoạt động. Với mục đích giảm chi phí vận hành, nhu cầu sửa chữa các chốt bị hỏng là rất lớn. Bên cạnh phương pháp sửa chữa truyền thống, có thể áp dụng quy trình tiên tiến hơn được gọi là in 3D laser bột, là một trong những ứng dụng quan trọng trong gia công vật liệu laser, được đề xuất để tiến hành công việc sửa chữa, phục hồi các chi tiết quan trọng [3]. Việc sửa chữa này được thực hiện bằng cách dựng lại chốt (Tennon) bị hỏng bằng quy trình in 3D laser. Với các cánh tua bin hơi nước đã qua sử dụng được làm bằng thép không gỉ 422 martensitic sẽ được nghiên cứu sửa chữa, phục hồi bằng quá trình in 3D laser sử dụng bột thép không gỉ 422 cùng loại.

Mục đích chính của bài báo này là tìm ra các thông số quy trình in 3D laser bột thích hợp để sửa chữa, phục hồi chốt của cánh tuabin. Do vậy, việc nghiên cứu tác động của các thông số quy trình (công suất nguồn laser, tốc độ cấp bột) cho quy trình in 3D laser nhiều lớp lên các mẫu phủ là rất quan trọng. Cuối cùng, các thử nghiệm mô phỏng được tiến hành bằng cách sử dụng sự các thông số tối ưu cho quá trình in 3D laser nhiều lớp kim loại để tạo chốt trên cánh tuabin mô phỏng và sau đó kiểm tra cơ tính của liên kết chốt.

2. VẬT LIỆU, THIẾT BỊ NGHIÊN CỨU VÀ QUÁ TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu, thiết bị nghiên cứu

Cánh tuabin thép không gỉ AISI 422 (Kim loại cơ bản-KLCB) đã qua sử dụng và bột thép không gỉ cùng loại do Viện Nghiên cứu Năng lượng Đài Loan cung cấp đã được sử dụng trong nghiên cứu này, với thành phần hóa học và các cơ tính được thể hiện trong Bảng 1.

Bột kim loại được sử dụng làm vật liệu in có dạng hạt cầu, đường kính nhỏ hơn 150 ☞

μm. Cánh tuabin 422 SS đã qua sử dụng có chốt nối bị hỏng từ cánh động cơ tuabin khí được sử dụng cho các thí nghiệm in laser 3D một lớp và nhiều lớp. Nguồn laser sợi quang công suất cao 5000W – YLR-5000 (Hình 1) với đầu in 3D có thể điều khiển chính xác CNC đã được sử dụng cho quá trình in laser 3D. Trước quá trình in laser 3D, vật liệu KLCB từ cánh tuabin đã qua sử dụng được xử lý nhiệt bao gồm austenit hóa ở 1040°C với thời gian 1 giờ trong lò chân không, sau đó làm nguội trong khí quyển, tiếp theo là xử lý nhiệt ủ trong 2 giờ ở nhiệt độ 750°C và làm mát bằng không khí để cải thiện độ dẻo và độ dai va đập [4]. Để tránh nứt nguội trong quá trình xử lý vật liệu có độ cứng cao như vật liệu thép không gỉ AISI 422, tất cả các mẫu đều được nung nóng trước ở 200°C trước quá trình in laser 3D. Sau quá trình in laser 3D, các mẫu in 3D được xử lý nhiệt sau hàn để giảm ứng suất bằng cách ủ kim loại ở nhiệt độ 700°C trong 2 giờ (700°C/2h) và làm nguội ngoài không khí.

Bảng 1(a). Thành phần hóa học của kim loại cơ bản thép không gỉ AISI 422 và bột kim loại cùng loại

Thành phần hóa học / Vật liệu	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	W
Kim loại cơ bản AISI 422 SS		0.24	0.38	0.71	0.016	0.006	0.034	0.76	11.98	1.07	0.26	0.99
Bột kim loại AISI 422 SS		0.24	0.15	0.37	0.007	0.007		0.75	12	0.97	0.2	0.95

Bảng 1(b). Cơ tính của kim loại cơ bản thép không gỉ AISI 422 SS [5]

Điều kiện	Giới hạn bền		Giới hạn chảy		Độ dãn dài tương đối (%)	Độ cứng Vicker
	(ksi)	(Mpa)	(ksi)	(Mpa)		
Đã được xử lý nhiệt	133	915	117	808	15	304 HV

2.2. Quá trình thực nghiệm

Để tìm ra các thông số quy trình in laser 3D phù hợp, trước tiên quá trình in laser 3D một lớp kim loại được thử nghiệm với các thông số thay đổi bao gồm công suất laser từ 1000W ÷ 1500W, tốc độ cấp bột từ 5 g/phút ÷12 g/phút trong khi tốc độ đầu in được giữ không đổi ở mức 750 mm/phút. Sau khi tối ưu hóa thông số cho chất lượng lớp kim loại in 1 lớp tốt cùng với vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) càng hẹp càng tốt, quá trình in Laser 3D nhiều lớp được tiến hành với các thông số bao gồm cố định công suất nguồn laser 1300W, tốc độ đầu in được giữ không đổi ở mức 750 mm/phút và tốc độ cấp bột thay đổi từ 5 g/phút đến 8 g/phút đã được thử nghiệm (Bảng 2).

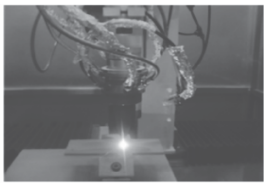
Bảng 2. Các thông số thực nghiệm của quá trình in laser 3D nhiều lớp.

	Thông số / Thí nghiệm	Công suất nguồn Laser (W)	Tốc độ đầu in (mm/phút)	Tốc độ cấp bột (g/phút)
In nhiều lớp kim loại	Thí nghiệm 1	1000W ÷ 1500 W	750	5
	Thí nghiệm 2	1000W ÷ 1500 W	750	6
	Thí nghiệm 3	1000W ÷ 1500 W	750	7
	Thí nghiệm 4	1000W ÷ 1500 W	750	8

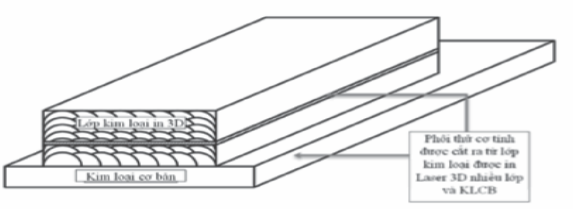
Sau khi tạo hình in 3D bột kim loại lên trên KLCB theo quy trình in laser nhiều lớp, các mẫu thử kéo và dai va đập Charpy, được chế tạo bằng cách cắt dây EDM từ lớp kim loại bột và KLCB (Hình 2), đã tuân theo tiêu chuẩn ASTM E8 và E23. Do hạn chế về vật liệu, kích thước của mẫu thử như được mô tả trong tiêu chuẩn ASTM E8 đối với các mẫu thử độ bền kéo có kích thước thu gọn như Hình 3 và các mẫu thử độ dai va đập có kích thước thu gọn 55 mm x 10 mm x 2,5 mm như Hình 4.

Cấu trúc vi mô của các mẫu in laser 3D được phân tích bằng Kính hiển vi quang học OLYMPUS GX-51 (OM) và Kính hiển vi điện tử quét JEOL-5410 (SEM). Các quan sát cấu trúc tế vi cũng được phân tích sau khi tẩm thực các mẫu bằng vật liệu Vilella.

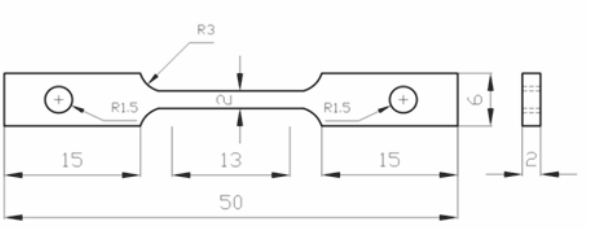




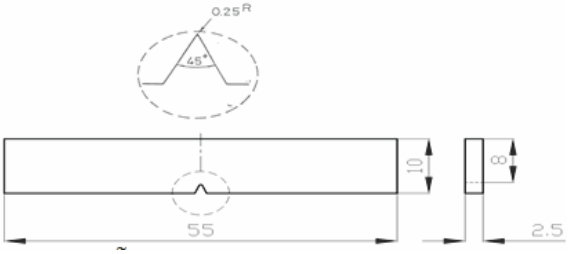
Hình 1. Nguồn hàn và đầu in laser 3D Ytterbium Fiber Laser YLR-5000W.



Hình 2. Phôi thử cơ tính được cắt ra từ lớp kim loại được in laser 3D nhiều lớp và kim loại cơ bản



Hình 3. Mẫu thử độ bền kéo với kích thước thu gọn



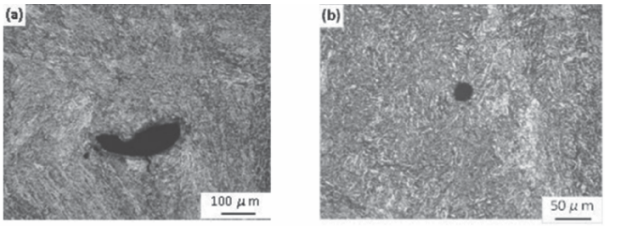
Hình 4. Mẫu thử độ dai va đập với kích thước thu gọn

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

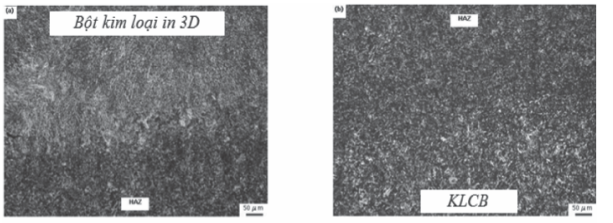
3.1. Cấu trúc tế vi của mẫu kim loại in cho quá trình in laser 3D nhiều lớp

Từ 4 thí nghiệm lớp kim loại in laser 3D nhiều lớp trong Bảng 2, qua quan sát cấu trúc tế vi, có thể thấy một số khuyết tật đắp như thiếu liên kết, lỗ rỗng và vết nứt nhỏ xuất hiện ở vùng lớp kim loại in sau khi kết tinh như các hình bên dưới. Khi tốc độ cấp bột cao ứng với 7 g/phút (Thí nghiệm 3 - Bảng 2) và 8 g/phút (Thí nghiệm 4 - Bảng 2) nguồn cung cấp nhiệt không đủ, có thể dẫn đến thiếu liên kết và nứt tế vi ở vùng nóng chảy như Hình 5 (a) với các thông số thí nghiệm 3, 4 ở Bảng 2. Bên cạnh đó, khuyết tật rỗ khí, được hiểu là các điểm không liên tục kiểu khoang (khoảng trống) hình thành do khí bị giữ lại trong quá trình bột kim loại đông đặc, đã được quan sát thấy trong Hình 5 (b) trong Thí nghiệm 3 của Bảng 2.

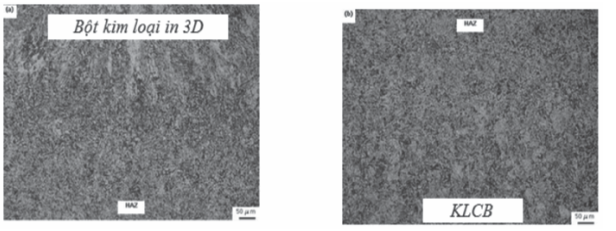
Hình 6 và Hình 7 là các ảnh cấu trúc tế vi kim loại in nhiều lớp điển hình trong điều kiện ngay sau khi in 3D và sau khi xử lý nhiệt (700°C/2h) tương ứng với vị trí quan sát là vùng tiếp giáp giữa lớp kim loại in và HAZ và giữa HAZ và KLCB. Do quá trình bột kim loại được in và kết tinh rất nhanh, cấu trúc của bột kim loại SS 422 mịn hơn với các vùng dạng cây như được thể hiện trong Hình 6 và Hình 7. So sánh cấu trúc tế vi của lớp kim loại in và KLCB trong Hình 6, có thể thấy rằng lớp bột kim loại in có cấu trúc hạt nhỏ mịn hơn đáng kể khiến nó có độ cứng vi mô cao hơn KLCB. Sau khi xử lý nhiệt (700°C/2h) như Hình 7, đã tăng kích thước hạt của lớp bột kim loại in, do đó bột kim loại in có độ cứng giảm đi đáng kể sau khi xử lý nhiệt (700°C/2h).



Hình 5. Các khuyết tật xuất hiện trong vùng lớp bột kim loại kết tinh của Thí nghiệm 3, 4 trong Bảng 2: (a) kim loại bột không được cấp đủ nhiệt để nóng chảy và bị nứt ; (b) rỗ khí



Hình 6. Cấu trúc tế vi lớp bột kim loại in đa lớp điển hình khi sau khi in 3D và kết tinh: (a) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa bột kim loại in 3D -HAZ và (b) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa HAZ-KLCB



Hình 7. Cấu trúc tế vi lớp bột kim loại in đa lớp điển hình khi sau khi in và xử lý nhiệt (7000C/2h): (a) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa bột kim loại in 3D -HAZ và (b) cấu trúc tế vi vùng tiếp giáp giữa HAZ-KLCB

3.2. Cơ tính của mẫu kim loại in cho quá trình in laser 3D nhiều lớp

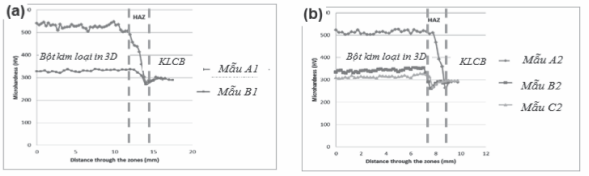
Dựa trên quan sát về cấu trúc tế vi chất lượng của lớp bột kim loại in sau khi kết tinh (tránh các khuyết tật như không liên kết, rỗ khí và nứt tế vi), hai bộ thông số Thí nghiệm 1 và 2 của Bảng 2 được lựa chọn tiếp tục in laser 3D nhiều lớp và sẽ tiến hành xử lý nhiệt ở

(650°C/2h và 700°C/2h) như Bảng 3. Sau đó, các mẫu KLCB và bột kim loại in đã được chọn để kiểm tra cơ học bao gồm Thử nghiệm độ cứng tế vi, Thử nghiệm kéo và Thử nghiệm dai va đập.

Dựa trên đánh giá độ cứng tế vi cho thấy độ cứng của lớp bột kim loại in laser 3D, HAZ và KLCB được xếp hạng theo thứ tự giảm dần như sau: Lớp bột kim loại in > HAZ > KLCB trong cả điều kiện in thông thường và sau khi xử lý nhiệt (Hình 8). Ngoài ra, cũng lưu ý rằng lớp bột kim loại in và HAZ có độ cứng cao hơn khoảng 20HV trong điều kiện xử lý nhiệt 650°C/2h so với xử lý nhiệt 700°C/2h (Hình 8 (b)).

Bảng 3. Các thông số thực nghiệm của quá trình in laser 3D nhiều lớp dùng để kiểm tra cơ tính

Quá trình	Mẫu thí nghiệm	Điều kiện xử lý mẫu	Công suất nguồn Laser (W)	Tốc độ đầu in (mm/phút)	Tốc độ cấp bột (g/phút)
In laser 3D nhiều lớp bột kim loại	A1	Thông thường	1300	750	5
	B1	Xử lý nhiệt (700°C/2h)			
	A2	Thông thường	1300	750	6
	B2	Xử lý nhiệt (650°C/2h)			
	C2	Xử lý nhiệt (700°C/2h)			



Hình 8. Độ cứng tế vi của vùng bột kim loại in 3D, vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) và KLCB của mẫu thí nghiệm: (a) Trong Thí nghiệm 1 của Bảng 3 trước và sau khi xử lý nhiệt và (b) Trong Thí nghiệm 2 của Bảng 3 trước và sau khi xử lý nhiệt.

Dựa trên đánh giá độ bền kéo từ Bảng 4, cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường có độ bền kéo, độ bền chảy cao hơn so với sau khi được xử lý nhiệt. Hơn nữa, qua các kết quả đo độ giãn dài tương đối cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D có độ dẻo được cải thiện sau khi nhiệt xử lý nhiệt. So với độ bền kéo của KLCB, cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường có độ bền kéo và độ bền chảy cao hơn đáng kể so với KLCB trong điều kiện ngay sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc (~1021 MPa). Rõ ràng, sau khi xử lý nhiệt (700°C/2h), lớp bột kim loại in laser 3D có độ bền kéo và độ bền chảy cao hơn một chút so với KLCB trong điều kiện xử lý nhiệt (~927 MPa).

Kiểm tra dai va đập Charpy để đánh giá độ dai của lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường và sau khi xử lý nhiệt. Dựa trên đánh giá va đập, cho thấy lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường có độ dai va đập thấp hơn đáng kể (~5J) so với sau khi xử lý nhiệt (~13J). So sánh với độ dai va đập của KLCB, không có sự khác biệt đáng kể về độ dai va đập của lớp bột kim loại in laser 3D trong điều kiện thông thường và xử lý nhiệt (700°C/2h) với KLCB trong điều kiện sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc và xử lý nhiệt (700°C/2h). ☞

Bảng 4. Kết quả đo độ bền kéo, độ dai va đập được thực hiện ở nhiệt độ phòng.

Mẫu kiểm tra cơ tính	Điều kiện xử lý	Giới hạn bền (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Độ giãn dài tương đối (%)	Độ dai va đập (J)
TA1	Thông thường	1420.7	970.7	3.60	4.5
TB1	Xử lý nhiệt (700°C/2h)	1010.36	860	13.19	12.0
TA2	Thông thường	2010.7	1756.5	6.88	5.5
TB2	Xử lý nhiệt (650°C/2h)	1074.7	901.4	13.13	11
TC2	Xử lý nhiệt (700°C/2h)	998.4	852.8	10.94	13.5
KLCB1a	Sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc	1021	850	12	3.5
KLCB2a	Xử lý nhiệt (700°C/2h)	927	798.5	15	13

3.3. Thử nghiệm mô hình trước khi sửa chữa chốt bị hỏng của cánh tua bin đã qua sử dụng

Dựa trên cấu trúc tế vi và cơ tính của các mẫu bột kim loại in laser 3D sau khi in nhiều lớp bằng laser với các thông số khác nhau có thể lựa chọn thông số phù hợp (Công suất nguồn laser (1300 W), Tốc độ đầu in (750 mm/phút) và Tốc độ cấp bột (5 g/phút)) để in chốt lên trên cánh tuabin thu nhỏ. Sau khi tạo chốt, cánh tuabin thu nhỏ có chốt in đã được xử lý nhiệt (700°C/2h) để so sánh độ bền kéo với các mẫu vật có chốt làm bằng KLCB ở điều kiện sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc. Tất cả các mẫu vật đã được tiến hành thử kéo để đánh giá độ bền của phần chốt in sau khi tán nguội vào vỏ rotor. Dựa trên đánh giá độ bền kéo, độ bền của phần chốt in ở điều kiện xử lý nhiệt (700°C/2h) có giá trị cao nhất (54-55 kN) so với 30 kN của chốt làm bằng KLCB ở điều kiện sau khi lấy ra khỏi nơi làm việc. Kết quả thực nghiệm cho thấy các chốt được sửa chữa, thông qua quá trình in laser 3D nhiều lớp với các thông số phù hợp có thể đáp ứng được tải trọng kéo thiết kế tối thiểu là 30 kN (Bảng 5).

Bảng 5. Kiểm tra độ bền kéo chốt được tạo mới sau khi được tán nguội vào vỏ rotor [6].

Điều kiện mẫu đo	Quan sát mẫu sau khi thử kéo	Mẫu thí nghiệm	Tải trọng kéo lớn nhất (kN)
Cánh tuabin thu nhỏ có chốt làm bằng KLCB ở trạng thái như khi lấy ra khỏi nơi làm việc		1	30±3
		2	30±3
Cánh tuabin thu nhỏ có chốt in laser 3D đã được xử lý nhiệt (700°C/2h)		1	55±3
		2	55±3

4. KẾT LUẬN

1) Các tính chất cơ học của 422SS từ cánh tuabin đã qua sử dụng bao gồm độ cứng, độ dẻo và độ dai sau 100.000 giờ sử dụng có thể được phục hồi sau khi xử lý nhiệt (austenit hóa ở 1040°C trong 1 giờ trong lò chân không, sau đó làm nguội trong khí quyển 5 bar, tiếp theo là ủ ở 750°C trong 2 giờ và làm mát bằng không khí).

2) Kết quả thực nghiệm cho thấy các thông số quy trình in 3D laser bột kim loại đóng vai trò quan trọng trong chất lượng và cấu trúc tế vi mô của lớp bột kim loại in. Sau khi phân tích cấu trúc tế vi và các tính chất cơ học của các mẫu bột kim loại in trong cả quy trình in laser một lớp và nhiều lớp, bộ thông số quy trình in tối ưu bao gồm Công suất laser (1300 W), Tốc độ đầu in (750 mm/phút) và Tốc độ cấp bột (5 g/phút) đã được chọn để tạo chốt (Tenon) trên cánh tuabin.

3) Kết quả thực nghiệm cho thấy chốt có thể sửa chữa bằng công nghệ in laser 3D nhiều lớp kim loại và có độ bền của phần chốt in sau khi tán nguội vào vỏ rotor có tải trọng kéo (~55 kN) cao hơn KLCB sau khi tán nguội biến dạng và đạt tải trọng kéo thiết kế tối thiểu là 30 kN. Như vậy, quá trình in 3D laser bột kim loại nhiều lớp có thể được áp dụng để sửa chữa chốt đầu chốt nối bị hỏng của cánh tuabin đã qua sử dụng.

Lời cảm ơn:

Tác giả xin cảm ơn Giáo sư Ye-Ee Wu và Giáo sư Hsien-Lung Tsai đã giúp đỡ và hỗ trợ. Xin cảm ơn Tiến sĩ Hsien-Cheng Wu và các đồng nghiệp tại Viện Nghiên cứu Năng lượng Đài Loan đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **29/5/2025**
Ngày phản biện: **16/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. C. L. Ou, R. K. Shiue, "*Microstructural evolution of brazing 422 stainless steel using the BNi-3 braze alloy*". Journal of Materials Science, Vol.38 (2003), 2337-2346.

[2]. T.C. Yang, C. Chen, "Laser Welding of 422 Stainless Steel with Inconel 625 Filler Metal". ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 5, 852-857.

[3]. L. Sextona, S. Lavina, G. Byrnea, A. Kennedyb, "*Laser cladding of aerospace materials*". Vol.122 (2002), 63-68.

[4]. George E. Totten, "Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies". CRC Press, Taylor and Francis group (2006).

[5]. ASM Handbook, "*Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*", Volume 1 (2005), pp.1352-1355.

[6]. C.-M. Lin, S.-H. Yen, L. Tran, Y.-E. Wu, H.-C. Wu & H.-L. Tsai, "*Experimental investigation into microstructure, metallurgy and mechanical properties of AISI 422 stainless steel weldments produced using fibre laser welding direct forming*". The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science (04 Jul 2016), DOI: 10.1080/00084433.2016.1196850.

MÔ PHỎNG KHE HỞ ĐẦU CÁNH TUABIN SỬ DỤNG KHOANG LÕM KẾT HỢP GÂN

SIMULATION OF TURBINE BLADES TIP CLEARANCE USING CONCAVE CAVITY COMBINED WITH RIBS

Nguyễn Anh Tuấn
Khoa Cơ Điện tử, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: tuan.nguyenanh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu trình bày ảnh hưởng khí động của cấu trúc khoang lõm kết hợp gân đầu mút lá cánh tuabin hướng trục thông qua mô phỏng CFD sử dụng mô hình rối k-ω SST. Các tham số hình học như chiều sâu khoang (h), độ dày gân (w), và số lượng gân (r) được khảo sát để đánh giá hiệu quả giảm dòng rò rỉ và cải thiện hiệu suất đoạn nhiệt. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng các cấu trúc khoang lõm đầu mút kết hợp gân mang lại sự cải thiện về hiệu suất tầng tuabin, công suất đầu ra cũng như giảm thiểu lưu lượng dòng rò rỉ qua đầu mút lá cánh, làm giảm bớt tổn thất, giảm bớt tải nhiệt trên vùng đầu mút, giúp lá cánh hoạt động bền hơn trong điều kiện nhiệt độ cao.

Từ khóa: *Khoang lõm; Gân đầu mút; Tuabin hướng trục; Dòng rò rỉ; CFD; k-ω SST; Hiệu suất; Công suất đầu ra; Tải nhiệt.*

ABSTRACT

The study presents the aerodynamic effects of concave cavity structures combined with ribs of axial turbine blades through CFD simulation using k-ω SST turbulence model. Geometric parameters such as cavity depth (h), rib thickness (w), and number of ribs (r) are investigated to evaluate the effectiveness of reducing leakage flow and improving adiabatic efficiency. The research results show that the use of concave cavity structures combined with ribbed tip brings about improvement in turbine stage efficiency, output power as well as minimizing leakage flow through blade tip, reducing losses, reducing heat load on the tip region, helping the blades operate more durably under high temperature conditions.

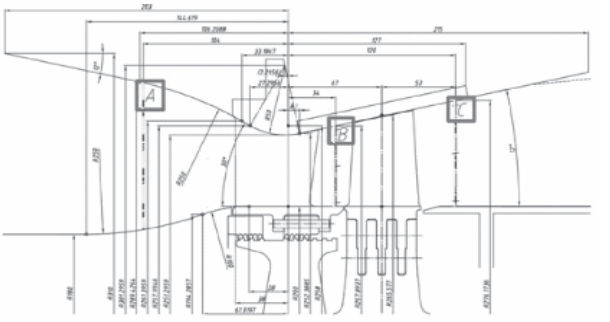
Keywords: *Gas turbine blades; Concave cavity structures; Leakage flow; CFD; Turbine stage efficiency; Output power; Heat load.*

1. MỞ ĐẦU

Trong động cơ tuabin khí, khe hở giữa đầu mút lá cánh quay và vỏ ngoài là nguyên nhân chính gây ra hiện tượng rò rỉ dòng khí, dẫn đến tổn thất năng lượng và giảm hiệu suất tổng thể của động cơ. Dòng rò rỉ này hình thành khi chênh lệch áp suất giữa mặt áp và mặt hút đẩy dòng khí qua khe hở tại đầu cánh, tạo nên các xoáy rò làm biến dạng trường dòng chính, tăng entropy và gây tổn thất đoạn nhiệt nghiêm trọng [1], [2].

Nhiều nghiên cứu tập trung vào việc giảm tổn thất khí động tại đầu mút lá cánh tuabin bằng các phương pháp kiểm soát bị động, trong đó có thiết kế đầu mút dạng khoang lõm (cavity squealer). Các nghiên cứu của Heyes [3], Mumic [4], Key và Arts [5] cho thấy thiết kế này giúp giảm đáng kể tổn thất khí động, hệ số truyền nhiệt và lưu lượng dòng rò rỉ so với đầu mút phẳng hoặc tự do. Ngoài ra, một số nghiên cứu khác còn mở rộng sang các dạng cải tiến như kết hợp gân chắn [6], winglet [7] hay xử lý vỏ [8-9], cho thấy tiềm năng nâng cao hiệu suất tuabin mà không cần sử dụng tấm che đầu mút.

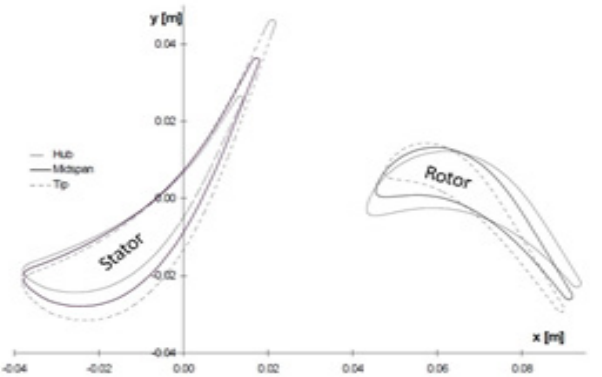
Nghiên cứu này tập trung khảo sát ảnh hưởng của hình học đầu mút dạng khoang lõm kết hợp gân đến cấu trúc dòng rò và hiệu suất đoạn nhiệt của tầng Rotor cánh tuabin hướng trục. Phương pháp mô phỏng số (CFD) sử dụng mô hình rối SST k-ω được áp dụng để phân tích chi tiết ảnh hưởng của các thông số hình học như chiều sâu khoang, độ dày gân, và số lượng gân đến đặc tính xoáy và thông số hiệu suất.



Hình 1. Hình học đường bao dòng chảy [10]

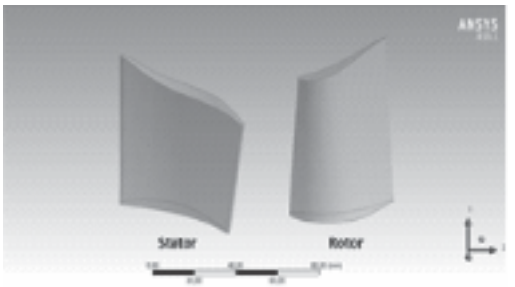
2. MÔ HÌNH VÀ ĐIỀU KIỆN BIÊN

Đối tượng nghiên cứu là một hệ thống tuabin thử nghiệm một tầng đơn dọc trục cận âm (Transonic) tại Đại học Công nghệ Graz, Áo, gồm 36 lá cánh động (Rotor) và 24 lá cánh tĩnh (Stator). Đường bao dòng chảy (meridional flow path) được thể hiện trong Hình 1. Vị trí các mặt cắt A, B, C chỉ các vị trí đầu vào (inlet), mặt giao rotor-stator (interface) và đầu ra (outlet). Mỗi lá cánh động và lá cánh tĩnh sẽ có các thông số chi tiết [10] để có thể thiết kế. Nghiên cứu này sử dụng mô đun Design Modeller trong ANSYS 2025 R1 [11] để dựng biên dạng lá cánh. Mỗi lá cánh sẽ có ba biên dạng ứng với ba mặt phẳng (theo chiều cao) với tọa độ cho trước, mỗi một tọa độ sẽ có những thông số tương ứng [10]. Hình 2 mô tả 3 đường biên dạng (chân cánh, giữa thân, đỉnh cánh).



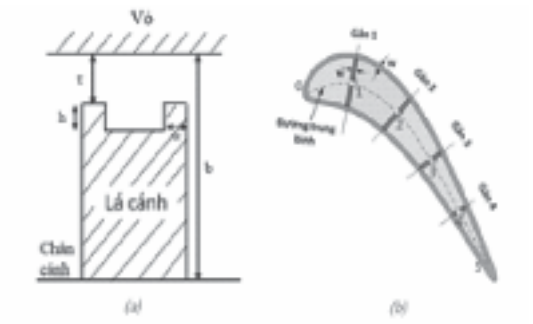
Hình 2. Ba đường biên dạng lá cánh rotor và stator

Dựa vào những thông số thiết kế và những dữ liệu cần thiết [10], hình học 3D của các lá cánh được thiết kế (Hình 3).



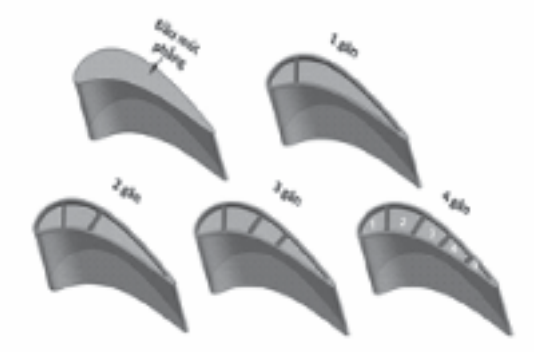
Hình 3. Thiết kế lá tĩnh và lá động bằng Design Modeller trong ANSYS 2025 R1

Các tham số của khoang lõm kết hợp gân tại Rotor được mô tả bởi Hình 4, trong đó 3 tham số cần khảo sát gồm h, w, r, với h là độ sâu khoang lõm (tỷ lệ theo khe hở đầu mút τ bằng 1mm), w là độ dày của thành chắn (cũng tỷ lệ theo khe hở đầu mút τ), r là số lượng gân. Các gân nằm trong khoang lõm đều vuông góc với đường trung bình.



Hình 4. Hình học đầu mút lá cánh có khoang chứa kết hợp gân từ hai hướng

Vị trí gân được xác định như sau: từ đường trung bình của đầu mút, ta chia đều đường này ra 5 đoạn bằng nhau, tương ứng với nó là các vị trí từ 0 đến 5 (Hình 4b). Hình 5 mô tả các dạng đầu mút lá rotor khi khảo sát sự thay đổi về số lượng gân trong khoang lõm. Độ rộng gân có giá trị bằng độ dày thành chắn (w), độ cao gân sẽ bằng độ sâu của khoang lõm (h).



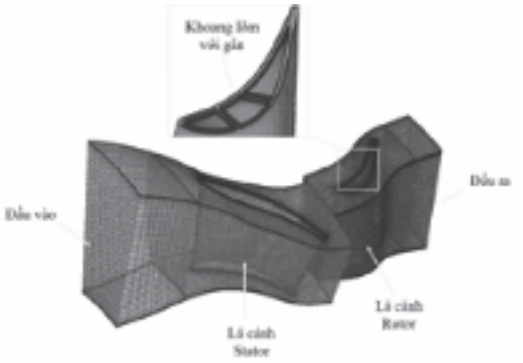
Hình 5. Các dạng đầu mút lá cánh khi số lượng gân thay đổi

Trong nghiên cứu khảo sát tham số, chỉ có một tham số được thay đổi còn các tham số khác sẽ được giữ nguyên. Dưới đây là bảng mô tả tham số tham chiếu làm gốc và bảng tham số thay đổi để khảo sát.

Bảng 1. Tham số tham chiếu và sự thay đổi tham số khảo sát

	Tham số tham chiếu	**Tối thiểu**	**Tối đa**	**Bước**
w/τ	1	0,5	2	0,5
h/τ	1,5	0,5	2,5	0,5
r	2	1	4	1

Khoảng cách khe hở được cố định tại τ = 1mm trong mọi trường hợp khảo sát. Toàn bộ miền tính toán được chia làm 3 phần gồm: lá cánh tĩnh (stator), lá cánh động (Rotor) và khoang lõm đầu mút kết hợp gân, sử dụng mô đun Turbo Grid để chia lưới cho lá cánh tĩnh và lá cánh động. Riêng phần khoang lõm đầu mút kết hợp gân sẽ sử dụng mô đun ICEM để tạo chất lượng lưới cao, giúp khâu tính toán dòng phức tạp trên đầu mút lá Rotor cho ra kết quả tốt nhất. Cả hai mô đun chia lưới này đều được tích hợp sẵn trong ANSYS 2025 R1, lưới được tạo ra là lưới cấu trúc, phần tử lưới được tạo ra là phần tử lục diện (hexahedral).



Hình 6. Lưới toàn bộ miền mô phỏng

Ở cả ba miền chia lưới, lưới được chia sao cho kích thước phần tử lưới đầu tiên của tường phải rất nhỏ, khoảng 0,001 mm từ đó sẽ cho ra giá trị y+ phù hợp với mô hình rối k-ω SST đã chọn, giúp kết quả mô phỏng chính xác và có độ tin cậy cao hơn.

Mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm ANSYS CFX 2025 R1 trong điều kiện ba chiều, không nén (incompressible) và trạng thái ổn định (steady state). Điều kiện đầu vào được đặt là áp suất tổng 3,439 bar và nhiệt độ tổng 454,4 K. Tại đầu ra, áp suất tĩnh được thiết lập là 1,102 bar. Các bề mặt tường được giả định không trượt (no-slip), không làm mát và không trao đổi nhiệt. Rotor với khoang lõm có gân đầu mút được thiết lập chuyển động quay với vận tốc 11000 vòng/phút, với điều kiện nối ghép (interface) với stator kiểu frozen rotor. Mô hình rối SST k-ω được lựa chọn nhằm kết hợp khả năng mô phỏng xoáy đầu mút và gradient vận tốc gần tường.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Khảo sát ảnh hưởng của lưới

Sự hội tụ của lưới trong nghiên cứu này được khảo sát với trường hợp đầu mút lá rotor phẳng (không có khoang lõm kết hợp gân trên đầu mút lá). Sự đối chiếu về tỉ số nén, hiệu suất đoạn nhiệt cho các trường hợp lưới khác nhau được thực hiện. Tỷ số nén được biểu diễn như sau:

$$PR = \frac{P_{t,A}}{P_{t,C}} \quad (1)$$

Trong đó, PR là tỷ số nén, $P_{t,A}$ là áp suất tổng tại Inlet, $P_{t,C}$ là áp suất tổng tại Outlet. Hiệu suất đoạn nhiệt được biểu diễn như sau:

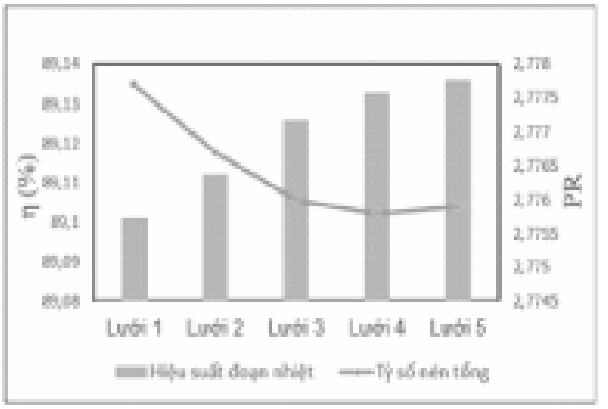
$$\eta = \frac{1 - \frac{T_{t,C}}{T_{t,A}}}{1 - \left(\frac{P_{t,C}}{P_{t,A}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (2)$$

Trong đó, η là hiệu suất đoạn nhiệt, $T_{t,C}$ và $T_{t,A}$ lần lượt là nhiệt độ tổng đầu ra và đầu vào của tuabin, γ là hằng số mũ đoạn nhiệt (γ= 1.4).

5 trường hợp lưới đã được khảo sát, (Bảng 2). Khi số lượng phần tử lưới vượt qua lưới 4, sự sai khác thấy được nhỏ nhất (sai khác 0,004% cho giá trị hiệu suất đoạn nhiệt giữa lưới 4 và lưới 5), vì vậy lưới 4 được lựa chọn làm cơ sở cho nghiên cứu.

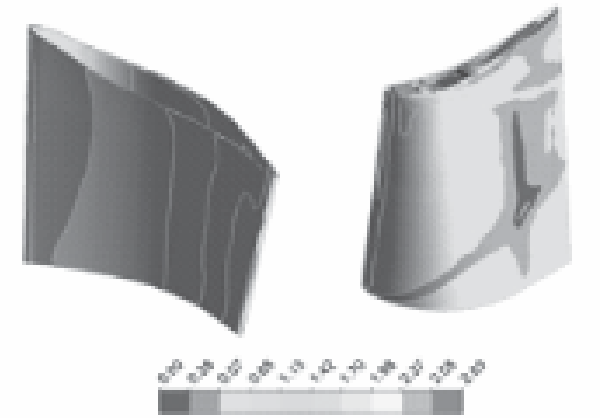
Bảng 2. Kết quả tính toán lưới

Lưới	Số lượng phần tử lưới	Hiệu suất đoạn nhiệt η [%]	Tỷ số áp suất tổng (PR)	ymax+
Lưới 1	682994	89,101	2,7777	12,026
Lưới 2	940350	89,112	2,7767	9,22215
Lưới 3	1218712	89,126	2,7760	7,476
Lưới 4	1549473	89,133	2,7758	2,87998
Lưới 5	1777101	89,136	2,7759	2,74389



Hình 7. Kết quả đánh giá sự hội tụ lưới

Với giá trị lớn nhất của y+ nhỏ hơn 3, kết quả mô phỏng số là chấp nhận được.

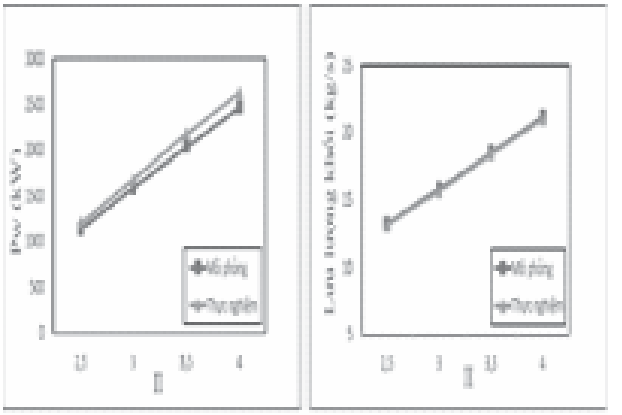


Hình 8. Phân bố y^+ của lưới 4

Kết quả mô phỏng số cũng được so sánh với dữ liệu thực nghiệm từ [10] để đối chiếu (giá trị Π: tỷ số giãn). Hai thông số lưu lượng khối của dòng và công suất đầu ra của tuabin được sử dụng để so sánh. (Hình 9) với công suất đầu ra được tính theo công thức sau:

$$P_w = \dot{m}(h_{t,B} - h_{t,C}) \quad (3)$$

Trong đó, P_w là công suất đầu ra, m là lưu lượng khối dòng, $h_{t,b}$ là entanpy tổng tại mặt giao giữa Rotor-Stator, $h_{t,C}$ là entanpy tổng tại Outlet.



Hình 9. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

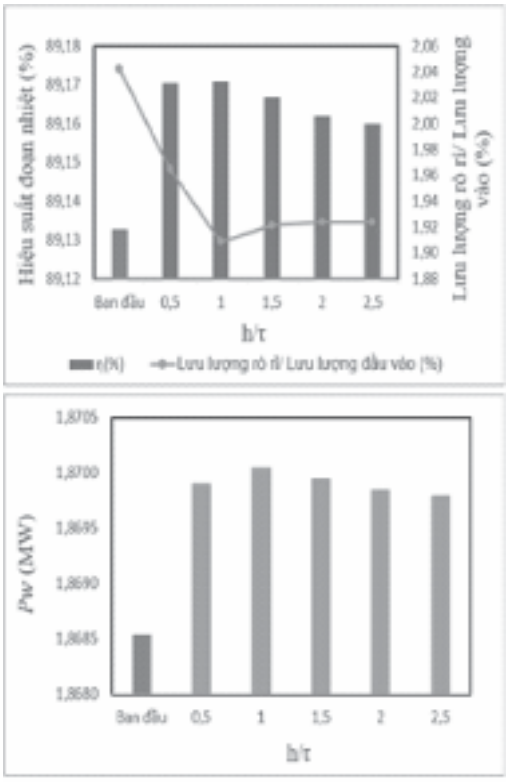
Hình 9 cho thấy kết quả mô phỏng số của lưu lượng khối dòng chảy tại các điều kiện vận hành khác nhau gần như khớp với số liệu thực nghiệm. Còn giá trị công suất tuabin tại các điều kiện vận hành thay đổi cho ra kết quả khá sát với dữ liệu thực nghiệm. Vì vậy, phương pháp số được sử dụng trong nghiên cứu cho thấy khả năng dự đoán khá chính xác hiệu suất động lực học của tuabin.

3.2. Khảo sát dòng qua đầu mút lá cánh áp dụng khoang lõm kết hợp gân

3.2.1. Khảo sát thông số h

h là độ sâu của khoang lõm trên đầu mút và được khảo sát tỷ lệ theo khe hở τ ở Hình 10. 5 trường hợp thay đổi lần lượt với h = (0.5τ, 1τ, 1.5τ, 2τ, 2.5τ). Hai giá trị w và r được giữ nguyên theo thông số tham chiếu.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

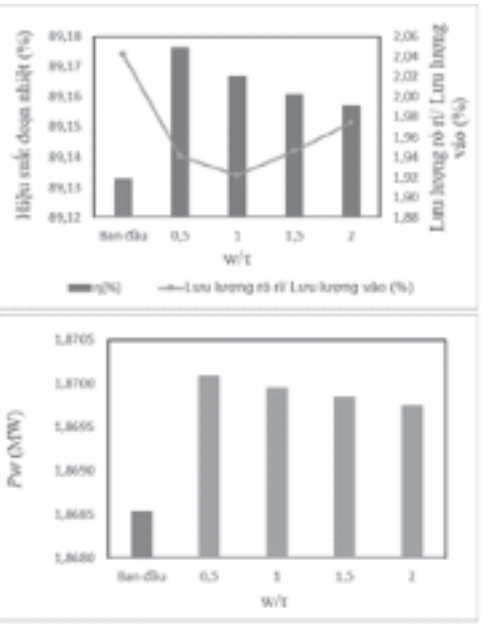


Hình 10. Biến thiên hiệu suất đoạn nhiệt, tỷ số lưu lượng, công suất đầu ra khi thay đổi độ sâu h

Hình 10 cho thấy hiệu suất đoạn nhiệt và công suất đầu ra đều tăng khi áp dụng đầu mút khoang lõm kết hợp gân, đạt giá trị cao nhất tại độ sâu h = 1τ với hiệu suất 89,171% và công suất 1,87005 MW, so với 89,133% và 1,86854 MW ở đầu mút phẳng. Xu hướng của biểu đồ hiệu suất là hiệu suất tăng dần đến khi độ sâu khoang lõm đạt giá trị h = 1τ. Sau mốc này, các giá trị bắt đầu giảm nhẹ khi h tiếp tục tăng. Tỷ lệ lưu lượng dòng rò rỉ cũng giảm rõ rệt, thấp nhất tại h = 1τ (1,90879%), so với 2,04252% ban đầu. Nhìn chung, mọi cấu hình khoang lõm đều cho hiệu quả hơn so với đầu mút phẳng.

3.2.2. Khảo sát thông số w

Độ dày thành chắn cũng được khảo sát. 4 trường hợp thay đổi w = (0.5τ, 1τ, 1.5τ, 2τ) ứng với độ dày thành chắn tăng dần được thể hiện ở Hình 11.



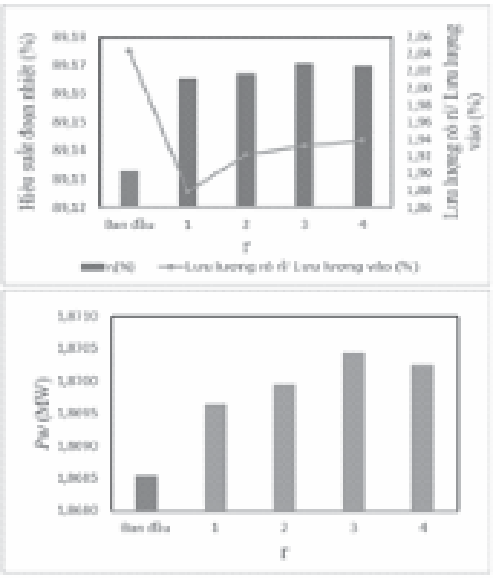
Hình 11. Biến thiên hiệu suất đoạn nhiệt, tỷ số lưu lượng, công suất đầu ra khi thay đổi độ dày thành chắn w

Có thể thấy xu hướng giảm dần giá trị khi tăng độ dày thành chắn. Ở trường hợp thành chắn mỏng nhất, hiệu suất đạt được là lớn nhất 89,1765%, tương ứng với nó thì giá trị công suất đầu ra cũng lớn nhất 1,8701 (MW). Khi độ dày thành chắn lớn nhất, hiệu suất giảm nhiều nhất nhưng vẫn cao hơn giá trị hiệu suất ban đầu (89,133%). Độ dày thành chắn tăng làm giảm thể tích các khoang chứa, lượng dòng trào vào các khoang giảm đi nên lượng các xoáy rối được tạo ra trong khoang cũng sẽ giảm bớt, từ đó sự cản dòng rò rỉ qua đầu mút bị giảm hiệu quả. Chính vì vậy, hiệu suất đạt được bị giảm khi chiều dày thành chắn tăng.

3.2.3. Khảo sát thông số r

r là số lượng gân được sử dụng để kết hợp với khoang lõm đầu mút. Có tất cả 4 trường ☞

hợp cần được khảo sát với số lượng gân lần lượt là r = (1,2,3,4).

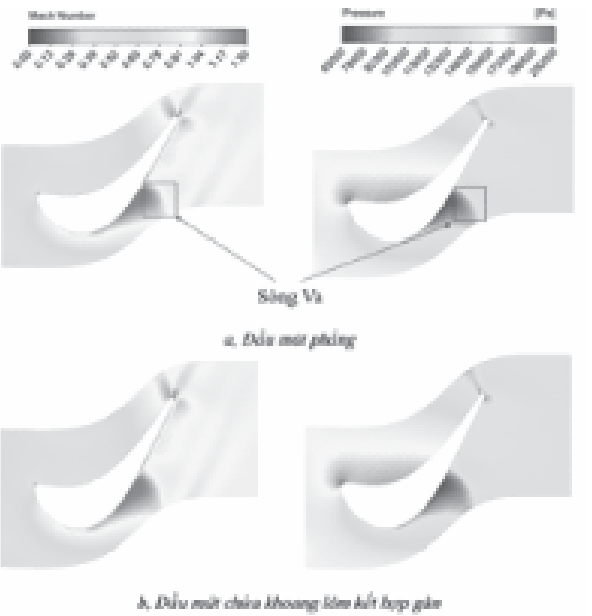


Hình 12. Biến thiên hiệu suất đoạn nhiệt, tỉ số lưu lượng, công suất đầu ra khi thay đổi số lượng gân

Khi tăng số lượng gân, hiệu suất và công suất đầu ra có xu hướng tăng lên, và đạt giá trị cao nhất khi có 3 gân được sử dụng với hiệu suất đạt 89,171%, công suất đầu ra 1,87045 (MW), đây cũng là giá trị công suất đầu ra cao nhất đạt được trong tất cả trường hợp khảo sát. Khi tăng số lượng gân, dòng sau khi vào khoang chứa đầu mút chịu sự va đập nhiều hơn khi thành chắn hay thành tạo ra bởi gân tăng lên, từ đó các xoáy rối hỗn loạn trong khoang tạo ra một cách nhanh chóng hơn so với trường hợp ít gân, gây nghẽn khí đầu mút và hiệu suất của tuabin tăng cao hơn. Khi số lượng gân tăng lên 4 gân, hiệu suất hay công suất có giảm một chút nhưng không đáng kể.

3.3. Các phân tích hình ảnh nghiên cứu

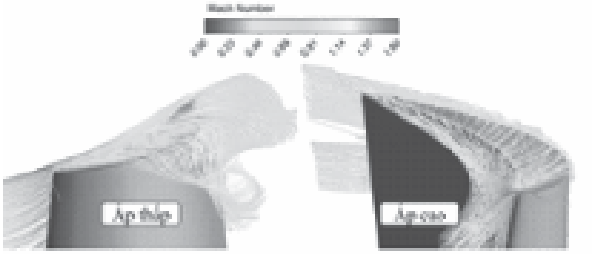
Với tua bin thử nghiệm dọc trục cận âm, sự xuất hiện của sóng va là không thể tránh khỏi. Hình 13 thể hiện sự xuất hiện của hiện tượng song va.



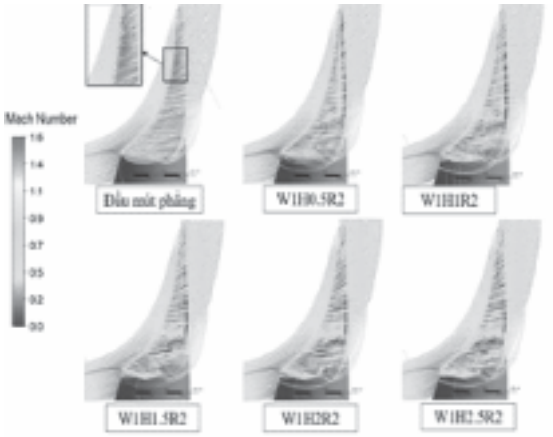
Hình 13. Phân bố vận tốc và áp suất tại mặt phẳng sải giữa cánh rotor

Hình 13 cho thấy vị trí và độ dày của lớp sóng va qua sự phân bố số Mach và áp suất tại mặt phẳng sải giữa của lá rotor. Qua đó, áp suất đã được gia tăng còn vận tốc dòng chảy đã giảm một cách đột ngột. Tuy nhiên không có sự khác biệt nhiều ở cả trường hợp đầu mút phẳng hay có sử dụng khoang lõm.

Hình ảnh dòng ở Hình 14 mô tả quỹ đạo dòng chảy qua khe hở hướng kính trong trường hợp đầu mút phẳng.

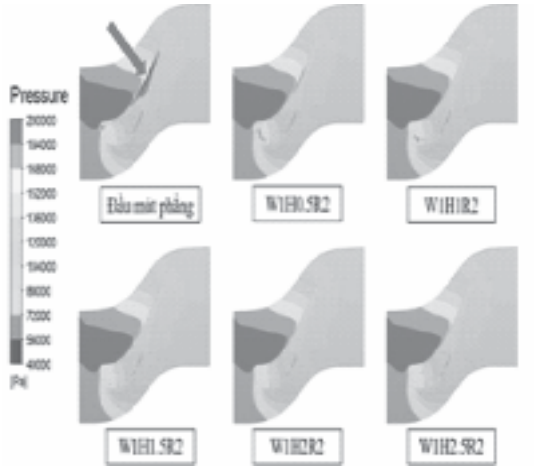


Hình 14. Quỹ đạo dòng qua khe hở đầu mút phẳng nhìn từ 2 phía



Hình 15. Đường dòng qua đầu mút lá rotor khi cố định chiều dày thành chắn (w = 1) và số lượng gân (r = 2)

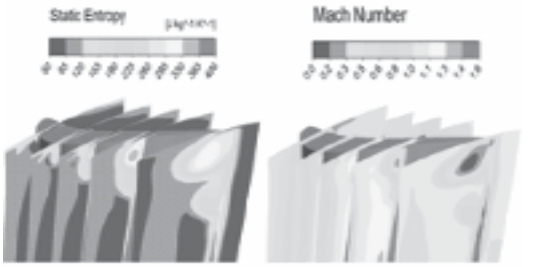
Khi sử dụng đầu mút dạng khoang lõm có gân, dòng chảy qua khe hở bị thay đổi đáng kể so với đầu mút phẳng. Dòng sau khi vượt qua thành chắn sẽ va đập vào các gân và thành phía áp thấp, tạo ra các xoáy rối phức tạp trong khoang, làm chậm dòng và gây hiện tượng nghẽn khí. Điều này khiến tốc độ dòng tràn qua khe hở giảm, từ đó giảm lưu lượng dòng rò rỉ. Ngoài ra, khi tăng chiều sâu khoang, các cấu trúc xoáy này trở nên rõ ràng và phát triển mạnh hơn, thể hiện rõ qua phân bố số Mach ở Hình 15.



Hình 16. Phân bố áp suất tĩnh gần vỏ khi thay đổi độ sâu h

Hình 16 đi kèm với hình ảnh phân bố áp suất gần tường trên cho thấy rõ sự chênh lệch áp giữa hai mặt lá cánh tại vùng đầu mút, giúp giải thích hướng chuyển động dòng qua khe hở (Hình 14). Ở đầu mút phẳng, tồn tại vùng sụt áp rõ rệt gần mép đuôi cánh do dòng trào qua khe hở tăng tốc mạnh. Khi áp dụng khoang lõm kết hợp gân, vùng sụt áp này giảm dần và biến mất theo độ sâu khoang. Nguyên nhân là do dòng bị chậm lại bởi các cấu trúc xoáy trong khoang, dẫn đến áp suất tại đầu mút tăng lên.

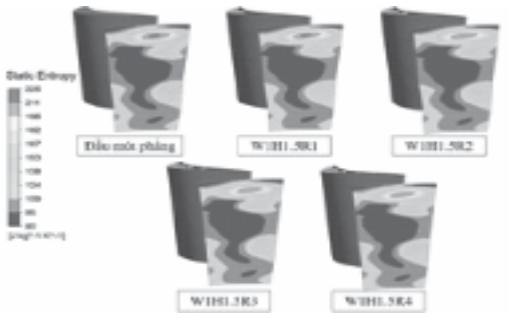
Để làm rõ sự hình thành của các dòng xoáy tại gần đầu mút góp phần đến tổn thất khí động học của tầng tuabin, sự phân bố entropy tĩnh và số Mach tại các mặt phẳng cắt liên tiếp theo hướng dọc trục được khảo sát trong Hình 17.



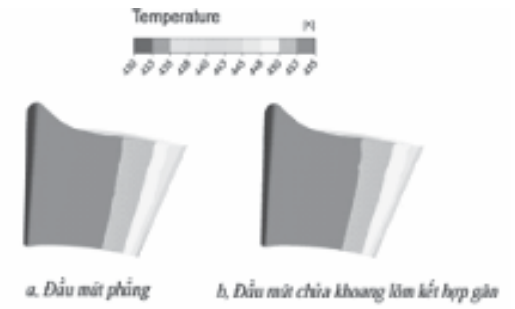
Hình 17. Phân bố entropy tĩnh và số Mach trong trường hợp đầu mút phẳng

Hai dòng xoáy riêng biệt đã được nhận diện rõ ràng: xoáy rò rỉ đầu mút và xoáy tách dòng từ bề mặt cánh. Cả hai được thể hiện qua các vùng entropy tĩnh tăng cao và vùng vận tốc thấp trong hình ảnh phân bố số Mach. Xoáy rò rỉ đầu mút hình thành từ dòng rò rỉ tràn qua khe hở từ phía áp suất cao sang áp suất thấp, có vận tốc rất thấp và bắt đầu hòa vào dòng chính từ sớm. Trong khi đó, dòng xoáy tách dòng hình thành gần bề mặt cánh, chuyển động ngược chiều với xoáy rò rỉ. Hai dòng xoáy này cùng đóng vai trò tiêu tán năng lượng cơ học thành nhiệt, thể hiện qua sự gia tăng entropy ở phía áp ☞

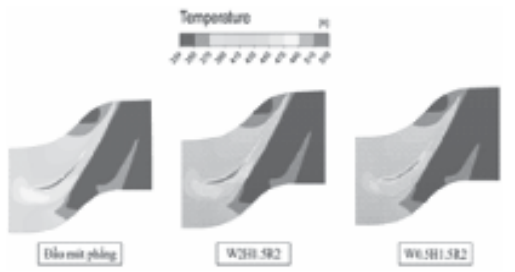
thấp của lá cánh [12]. Khi xét phân bố entropy tại mặt ra của tầng tuabin trong các trường hợp sử dụng khoang lõm kết hợp gân, cụ thể là có sự thay đổi số lượng gân ngang dòng ở Hình 18, giá trị entropy tĩnh tại các vùng xoáy có sự giảm nhẹ so với trường hợp đầu mút phẳng, đặc biệt là trường hợp có ba gân ngang dòng mà tại đó giá trị hiệu suất đoạn nhiệt lớn nhất. Điều này chứng tỏ các khoang chứa nghẽn khí trên đầu mút đã làm suy yếu dòng xoáy rò rỉ, dẫn đến sự phát triển của các xoáy xung quanh.



Hình 18. Entropy tĩnh tại mặt ra trong các trường hợp thay đổi số lượng gân



Hình 19. Phân bố nhiệt độ bề mặt lá cánh tĩnh



Hình 20. Phân bố nhiệt độ phần vỏ lá cánh động khi thay đổi độ dày thành chắn w

Dựa vào hình ảnh phân bố nhiệt độ trên bề mặt lá cánh tĩnh Hình 19 có thể thấy gần như không có sự khác biệt giữa trường hợp đầu mút lá cánh động phẳng với các trường hợp đầu mút áp dụng khoang lõm kết hợp gân. Điều này có thể giải thích bởi vì sự thay đổi các kích thước hình học trên khoang lõm tương đối nhỏ nên những ảnh hưởng này lên lá cánh tĩnh tương đối giống nhau [12]. Xu hướng chung là dòng từ đầu vào tương tác trực tiếp với mép vào của lá nên nhiệt độ những vùng này là cao nhất và nhiệt độ có xu hướng giảm dần khi đi dần về phía mép ra của lá, tương ứng với sự tăng tốc của dòng chảy trong kênh. Khi xét phần phân bố nhiệt độ trên vỏ lá cánh quay Hình 20, có thể thấy nhiệt độ có xu hướng giảm, đặc biệt ở vùng đỉnh lá sát phía áp thấp khi sử dụng khoang lõm kết hợp gân. Nhiệt độ có xu hướng giảm rõ rệt nhất khi độ dày thành chắn khoang lõm mỏng. Điều này giúp lá cánh động, đặc biệt phần đầu mút giảm thiểu tác động bởi nhiệt, bảo vệ vật liệu làm lá cánh.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã nắm bắt được cơ chế, đặc trưng dòng trào qua đầu mút lá cánh cũng như sự tạo thành các loại xoáy rối khác nhau và sự ảnh hưởng của nó lên tổn thất tổng thể của tầng tuabin. Sự ảnh hưởng khi thay đổi các tham số hình học khoang lõm đã được làm rõ, cho thấy sự hiệu quả hơn về hiệu suất khí động hay sự cản dòng rò rỉ qua đầu mút lá cánh khi độ dày thành chắn giảm đi, và độ sâu khoang lõm đạt tới một giá trị nhất định. Sử dụng các cấu trúc khoang lõm đầu mút kết hợp gân mang lại sự cải thiện về hiệu suất tầng tuabin, công suất đầu ra cũng như giảm thiểu lưu lượng dòng rò rỉ qua đầu mút lá cánh, làm giảm bớt tổn thất, giảm bớt tải nhiệt trên vùng đầu mút, giúp lá cánh hoạt động bền hơn trong điều kiện nhiệt độ cao. Tuy nhiên, yếu tố về truyền nhiệt trao

đổi nhiệt tại vùng đầu mút lá cánh động cần được làm rõ. Mô hình tuabin dọc trục cận âm cần tối ưu hơn nữa về mặt thiết kế và chia lưới hay có thể áp dụng một số cải tiến mới về hình dạng tại đầu mút lá cánh động. Ngoài ra, sự áp dụng các dạng ống dẫn khí làm mát hay những dạng khe rãnh trên vỏ cũng sẽ được nghiên cứu trong tương lai.❖

Ngày nhận bài: **21/5/2025**
Ngày phản biện: **12/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Booth, T.C. (1983), "*Rotor Tip Leakage Part I – Basic Methodology*". J. of Engineering for Power, Vol. 104, pp. 154-161.
[2]. Azad, G.S., Han, J.-C., Bunker, R.S. Bunker, Lee, C.P. (2002), "*Effect of squealer geometry arrangement on a gas turbine blade tip heat transfer*". J. Heat Transf. 124 (3), pp. 452-459.
[3]. Heyes, F.J.G., Hodson, H.P., Dailey, G.M. (1992), "*The effect of blade tip geometry on the tip leakage flow in axial turbine cascades*". J. Turbomach. Vol. 114, pp. 643-651.
[4]. Mumic, F., Eriksson, D., Sunde´n, B. (2004), "*On Prediction of Tip Leakage Flow and Heat Transfer*". In Gas Turbines ASME Paper No. 2004-GT-53448, 2004.
[5]. Key, N.L., Arts, T. (2004), "*Comparison of turbine tip leakage flow for flat tip and squealer tip geometries at high-speed conditions*". J. Turbomach. Vol. 128, pp. 213-220.
[6]. Krishnababu, S., Newton, P., Dawes, W., Lock, G., Hodson, H., Hannis, J., and Whitney, C. (2008), "*Aerothermal investigations of tip leakage flow in axial flow turbines-part i: effect of tip geometry and tip clearance gap*". Journal of Turbomachinery, Vol. 131(1), pp. 011006-011014.
[7]. Li, W., Qiao, W.Y., Xu, K.F., Luo, H.L. (2008), "*Numerical simulation of tip clearance flow passive control in axial turbine*". J. Therm. Sci. Vol. 17 (2), pp. 147-155.
[8]. Gumusel, B. (2008), "*Aerodynamic and Heat Transfer Aspects of Tip and Casing Treatments Used for Turbine Tip Leakage Control*". PhD thesis, The Pennsylvania State University.
[9]. Gao, J., Zheng, Q., Yu, G. (2012), "*Reduction of tip clearance losses in an un shrouded turbine by rotor casing contouring*". J. Propuls. Power, Vol. 28, pp. 936-945.
[10]. Erhard, J. (2000), "*Design, Construction and Commissioning of a Transonic Test Turbine Facility*". Ph.D. Thesis, Graz University of Technology, Austria.
[11]. ANSYS CFX-2025 R1, 2025, ANSYS Inc.
[12]. Liu, Y.M. (2017), "*Min Numerical Investigation of Heat Transfer and Tip Leakage Flow in High Pressure Turbines*". Master Thesis, 2017.

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO MÔ HÌNH MÁY ÉP BÁNH TRUNG THU SỬ DỤNG VI ĐIỀU KHIỂN ARDUINO NANO

DESIGN AND MANUFACTURE OF MOONCAKE PRESSING MACHINE MODEL USING ARDUINO NANO MICROCONTROLLER

PGS,TS. **Phan Văn Hiếu**
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: hieu.phanvan@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu thiết kế, chế tạo mô hình máy ép bánh trung thu sử dụng vi điều khiển Arduino nano, cụ thể là quá trình thiết kế, chế tạo mô hình máy ép bánh trung thu trên môi trường đồ họa, thiết kế điều khiển cho máy ép bánh trung thu và lắp ráp mô hình từ các thiết bị có sẵn trên thị trường, chạy thử tốt trên điều kiện khoa học công nghệ thực tiễn. Các kết quả này góp phần làm rõ thêm tiềm năng ứng dụng các thiết bị có sẵn trên thị trường, định hướng mới về việc thiết kế chế tạo máy ép bánh trung thu với giá thành thấp, không sử dụng các hệ thống, thiết bị ngoại nhập đắt tiền, sản phẩm này rất phù hợp với không gian các phòng lab đồng thời nó cũng rất tiện lợi cho việc chế thử sản phẩm sau khi lên ý tưởng một cách nhanh chóng.

Từ khóa: *Máy ép bánh trung thu; Vi điều khiển Arduino nano; Phần mềm nguồn mở GRBL; Inventor.*

ABSTRACT

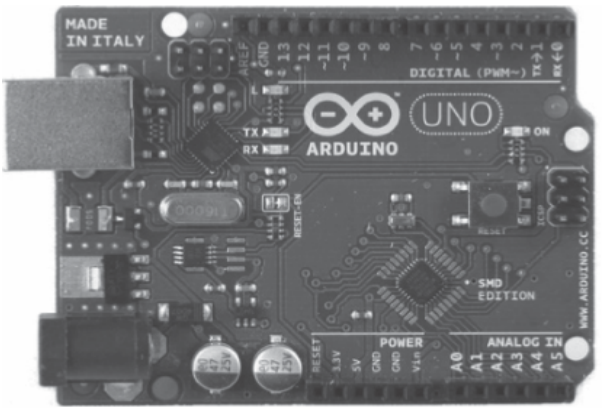
The paper presents some research results on the design and manufacture of a moon cake press model using Arduino nano microcontroller, specifically the process of designing and manufacturing a moon cake press model in a graphical environment, designing controls for the moon cake press and assembling the model from devices available on the market, running well on practical scientific and technological conditions. These results contribute to clarifying the potential application of devices available on the market, a new direction in the design and manufacture of moon cake presses at low cost, without using expensive imported systems and equipment, this product is very suitable for the space of lab, and it is also very convenient for testing products after quickly coming up with ideas.

Keywords: *Moon cake press machine; Arduino nano microcontroller; GRBL open-source software; Inventor.*

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, trong nhiều nhà máy và doanh nghiệp sản xuất việc chế tạo máy ép bánh vẫn còn áp dụng công nghệ sản xuất tương đối lạc hậu, chưa theo kịp với xu thế phát triển và đáp ứng được nhu cầu sản xuất trong nước và trên thị trường quốc tế. Chính vì thế, tác giả chọn đề tài: "Thiết kế, chế tạo mô hình máy ép bánh trung thu sử dụng vi điều khiển Arduino nano" với mong muốn đưa ra giải pháp nhằm cải thiện quá trình sản xuất sao cho giảm được chi phí nhân công, tăng năng suất mà vẫn đảm bảo được chất lượng sản phẩm, giảm giá thành sản phẩm để có thể cạnh tranh trên thị trường.

Như chúng ta đã biết, cốt lõi của hệ thống điều khiển điện tử hoặc cơ điện tử là việc nhận các tín hiệu điện tử, xử lý tín hiệu rồi xuất các tín hiệu điện tử theo kịch bản được thiết lập. Bo mạch Arduino UNO R3 là một trong các bo mạch được dùng để thực hiện các công việc xử lý tín hiệu kiểu trên; là một nền tảng thiết bị điện tử mã nguồn mở (GRBL) dựa trên sự giản tiện của phần cứng và phần mềm, vì thế chọn board mạch này làm bộ điều khiển cho máy ép.



Hình 1. Bo mạch Arduino UNO R3

Bài báo này sẽ giải quyết một hướng tiếp cận việc thiết kế, chế tạo máy ép bánh trên môi trường đồ họa, thiết kế điều khiển cho máy và lắp ráp máy từ các thiết bị có sẵn trên thị trường, chạy thử tốt trên điều kiện khoa học công nghệ thực tiễn.

2. THIẾT KẾ MÔ HÌNH MÁY ÉP BÁNH TRUNG THU

Thiết kế các chi tiết trong khối khung máy ép bánh.

Thiết kế các chi tiết trong khối xi lanh ép.

Thiết kế các chi tiết trong khối xi lanh đẩy bánh.

Lắp ghép hoàn thiện máy và vận hành máy.

Đặc điểm làm việc của máy ép bánh với yêu cầu là máy phải cứng vững, các thao tác có tốc độ chậm, không tạo gia tốc lớn và làm việc êm; kết cấu mô hình máy thuận tiện cho điều khiển; hệ thống điều khiển làm việc tin cậy, khả năng kháng nhiễu tốt.

***Nguyên lý làm việc:**

Công nghệ máy ép bánh dùng các xy lanh khí nén: xi lanh 1 thực hiện nhiệm vụ ép phôi bánh để tạo biên dạng, xi lanh 2 thực hiện nhiệm vụ tách phôi bánh ra khỏi khuôn bánh.

Để thực hiện được hai công đoạn đó, ở đây tác giả dùng bộ điều khiển sử dụng nút bấm vai trò xuất tín hiệu (start).

1 chu trình hoạt động.

Hành trình: xi lanh 1A+, 1A-, 2A+, 2A-

Hành trình xi lanh được điều khiển bằng hàm delay; giá trị hàm delay được điều khiển ☞

bằng 2 biến trở trong mạch điều khiển (biến trở xuất giá trị analog từ 0 đến 1023 tương ứng từ 0V đến 5V); thời gian delay bằng 5 lần A1 hoặc A2.

Mô hình máy ép bánh bao gồm 3 phần chính: Phần cơ khí, hệ thống khí nén, hệ thống điều khiển.

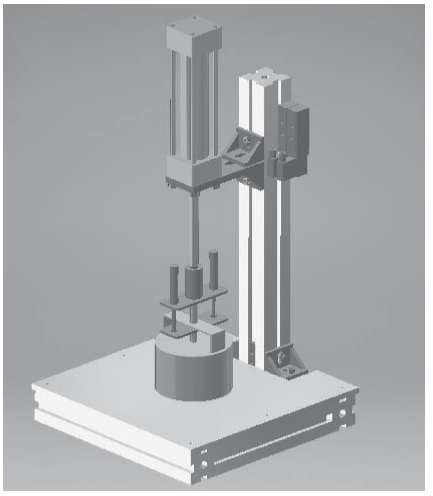
2.1. Thiết kế kết cấu cơ khí

Phần cơ khí của mô hình máy ép được thiết kế thành các bộ phận:

- Phần khung mô hình: Khung bàn máy được làm bằng các thanh nhôm định hình; mặt bàn mica; gắn với nhau bằng các mối ghép bu lông, đai ốc.

- Phần khối xi lanh ép bánh, tách bánh: Xi lanh ép bánh; cặp xi lanh tách bánh, tấm gá xi lanh ép bánh, cút nối; ke chìm; ke nổi; khuôn bánh [1].

• Thiết kế các chi tiết trong khối khung máy ép bánh



Hình 2. Mô hình 3D của khung máy ép

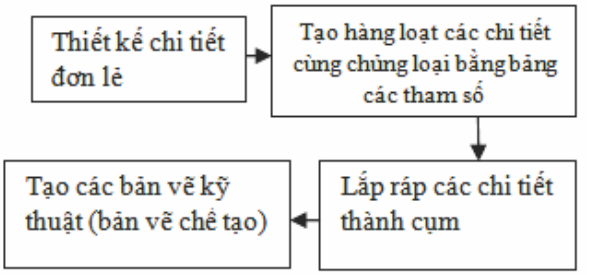
• Thiết kế các chi tiết trong khối xi lanh ép và đẩy bánh



Hình 3. Mô hình 3D của xi lanh ép và đẩy

Trình tự thiết kế: Từ một bản vẽ phác, tác giả phân tích, bóc tách thành từng cụm, từng chi tiết riêng rẽ, các mối liên hệ giữa chúng, dùng phần mềm Inventor để thực hiện việc xây dựng các vật thể trong không gian 3 chiều và xuất thành bản vẽ kỹ thuật.

Các mô hình 3 chiều gồm các chi tiết hình khối thể đặc và các hình tạo ra từ tấm kim loại hoặc các tấm vật liệu khác được thực hiện theo các bước sau:



Hình 4. Trình tự thiết kế máy ép bánh

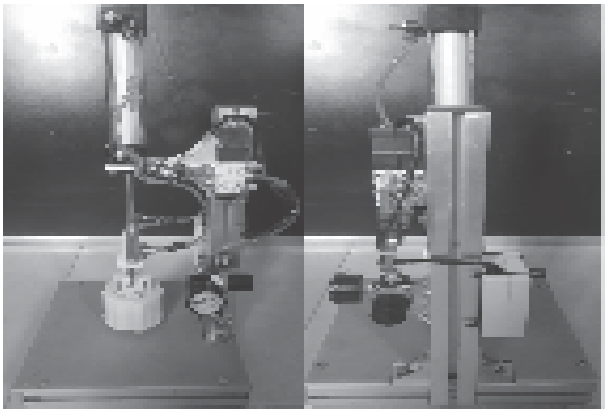
Thiết kế chi tiết đơn lẻ: Tập tin chứa chi tiết chỉ quản lý việc tạo ra một chi tiết hình khối thể đặc hoặc hình tấm. Tất cả các hình khối tạo ra trong tập tin này được hiểu là một chi tiết để sử dụng cho lắp ghép. Do đó khi thiết kế, trong một tập tin chỉ nên xây dựng một chi tiết duy nhất. Dùng chi tiết của tập tin này để lắp ghép với các chi tiết trong các tập tin khác. Tạo hàng loạt các chi tiết cùng chủng loại bằng bảng các tham số.

Lắp ráp các chi tiết thành cụm: Tập tin chứa cụm các chi tiết đã lắp ghép, tập tin này chứa các chi tiết có thể lắp ghép với nhau. Tại

tập tin này có thể tạo ra các cụm chi tiết hoặc các cụm chi tiết con. Lấy các chi tiết từ các tập tin đơn lẻ để ghép với nhau.

Tạo các bản vẽ kỹ thuật: Tập tin này chứa các bản vẽ phẳng có đầy đủ các hình chiếu của chi tiết hoặc cụm chi tiết 3D, kích thước của các chi tiết hoặc cụm chi tiết. Chúng ta cần phân biệt bản vẽ phác và bản vẽ xuất ra giấy vì theo quan điểm lập trình của phần mềm Inventor, bản vẽ phác là các bước thiết kế mô hình 2D hoặc 3D, còn bản vẽ kỹ thuật là kết xuất ra giấy của mô hình đã được thiết kế hoàn chỉnh dùng cho gia công. Đối với Drawing chúng tôi gọi là Bản vẽ kỹ thuật [2].

• Lắp ghép máy ép bánh



Hình 5. Mô hình máy ép bánh đã thiết kế

2.2. Thiết kế hệ thống điều khiển

Khi thiết kế hệ thống điều khiển cần đáp ứng một số yêu cầu sau: hệ thống điều khiển hoạt động tự động từ khâu ép bánh đến khâu tách bánh đưa vào thùng chứa, bộ điều khiển; hệ thống 2 xilanh ép và đẩy bánh; hệ thống điện khí nén phải hoạt động nhịp nhàng; độ an toàn lao động phải được đảm bảo.

Bộ điều khiển được thiết kế với trung tâm là board Ardunio Nano, thực hiện phân tích dữ liệu đầu vào được cài đặt và thực hiện bởi người dùng. Từ đó, thực hiện phân tích, xử lý và xuất tín hiệu đầu ra điều khiển các cơ cấu cơ khí.

Dữ liệu đầu vào cho bộ điều khiển bao gồm:

Tín hiệu từ nút bấm Start cho phép bắt đầu một chu trình ép bánh.

Tín hiệu Analog được đọc từ biến trở, được bộ điều khiển sử dụng làm dữ liệu để điều khiển thời gian ép bánh cho mỗi chu trình làm việc => giá trị Analog càng lớn, thời gian ép phôi bánh càng lâu, khi đó sẽ tạo được biên dạng mịn, đẹp cho bánh. Nhưng nếu thời gian ép bánh quá lâu sẽ ảnh hưởng đến bài toán năng suất, do vậy, cần phải cân đối trong việc điều chỉnh giá trị Analog để đảm bảo các yêu cầu về chất lượng, thẩm mỹ và kinh tế.

Tín hiệu đầu ra bao gồm:

Tín hiệu cho phép đóng ngắt relay 1, từ đó, đóng ngắt cuộn hút van điều khiển xi lanh ép bánh => điều khiển hành trình ra, vào của xilanh ép bánh, từ đó, phôi bánh được hình thành biên dạng sau quá trình xilanh ép xuống.

Tín hiệu cho phép đóng ngắt relay 2, từ đó, đóng ngắt cuộn hút van điều khiển 2 xilanh kéo khuôn bánh => điều khiển hành trình vào, ra của 2 xilanh kéo khuôn bánh, giúp tách rời phôi bánh sau ép ra khỏi khuôn bánh.

Cơ cấu chấp hành, bao gồm 3 xilanh, trong đó, có 1 xilanh vuông hành trình 10 cm, thực hiện nhiệm vụ ép phôi bánh để tạo biên dạng (ban đầu, xilanh ở trạng thái thu về), 2 xilanh nhỏ hành trình 3.5cm thực hiện nhiệm vụ tách phôi bánh ra khỏi khuôn bánh. 2 xilanh ☞

nhỏ được nối chung đầu vào và đầu ra để đảm bảo đồng tốc 2 xilanh (ban đầu, 2 xilanh ở hành trình đi ra).

Để điều khiển 2 cụm xilanh này, ta sử dụng 2 van 5/2 1 cuộn dây, tín hiệu đóng ngắt 2 van được gửi ra từ bộ điều khiển.

Điện khí nén:

Xilanh 1A ép bánh; Xilanh 2A tách bánh; Nút ấn phát tín hiệu đưa vào bộ điều khiển.

⇨ 1 chu trình hoạt động.

Hành trình: 1A+, 1A-,2A+,2A-;

Hành trình được điều khiển bằng hàm delay, giá trị hàm delay được điều khiển bằng 2 biến trở trong mạch điều khiển (biến trở xuất giá trị analog từ 0 đến 1023 tương ứng từ 0V đến 5V); thời gian delay bằng 5 lần A1 hoặc A2; Điều khiển nhanh, chậm ép bánh: bằng biến trở (thời gian cấp khí) [3],[4],[5].

• Thiết kế điều khiển mô hình

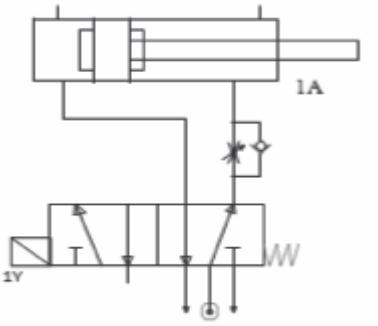
*Lưu đồ thuật toán

Lưu đồ này trình bày thuật toán tổng quát của mô hình máy ép bánh từ lúc khởi động hệ thống.

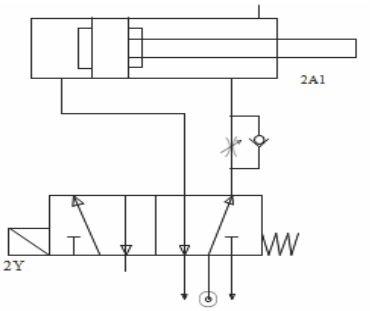


Hình 6. Lưu đồ thuật toán

• Hệ thống xy lanh điện khí nén



Xi lanh 1

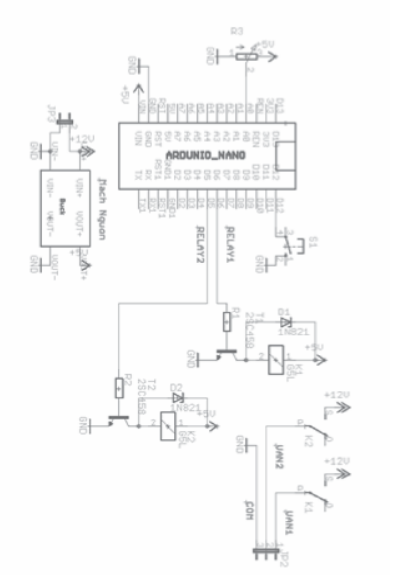


Xi lanh 2

Hình 7. Sơ đồ điện khí nén của xi lanh 1 và 2.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

• Hệ thống mạch điều khiển



Hình 8. Sơ đồ mạch điều khiển

• Chương trình điều khiển

```
#define sensorPin A0//định nghĩa chân đọc analog là chân A0
#define button 12 //chân kết nối nút bấm là chân 12
#define relay1 5 // chân xuất tín hiệu đóng relay1 là chân 5
#define relay2 6
word k;
int sensorValue = 0; // variable to store the value coming from the sensor void setup() {
pinMode(relay1,OUTPUT); //chọn chế độ cho chân relay1 là chân OUTPUT
pinMode (relay2, OUTPUT); //chọn chế độ cho chân relay2 là chân OUTPUT
pinMode(button,INPUT_PULLUP); //chọn chế độ cho chân button là chân INPUT có trở kéo lên dương nguồn
}
void loop() {
sensorValue = analogRead(sensorPin);//đọc giá trị Analog k=5*sensorValue; //gán hệ số k= giá trị analog* 5 lần
while(digitalRead(button)==HIGH);//chờ ấn phím để hoạt động
if(digitalRead(button)==LOW){
digitalWrite(relay1,HIGH); //bật van1 để xilanh to đi ra
delay(k); //delay (chờ)
digitalWrite(relay1,LOW); //cho xilanh To đi về
digitalWrite(relay2,HIGH); //cho 2 xi lanh Con đi về delay(2000); //chờ 2s
digitalWrite(relay2,LOW); //cho 2 xilanh con đi ra
}
delay(1000); //chờ 1000ms
}
```

3. CHẾ TẠO MÔ HÌNH MÁY ÉP BÁNH

Phần khung mô hình: Khung được lắp ghép từ những thanh nhôm định hình 40x40mm có độ cứng và thẩm mỹ cao; mặt khung; mặt bàn mica; cần gá xi lanh ép, xilanh tách bánh, gắn với nhau bằng các mối ghép bu lông, đai ốc. Trên các mặt của thanh nhôm đều có các rãnh vuông nên rất dễ lắp ghép, đồ gá các chi tiết lên một cách đơn giản.

Phần khối xi lanh ép bánh, tách bánh: Xi lanh ép bánh; cặp xi lanh tách bánh, tấm gá xi lanh ép bánh, cút nối; ke chìm; ke nổi; khuôn bánh.

Lắp ghép các chi tiết đã chế tạo và chạy thử mô hình máy ép bánh: Lắp ghép các khối của mô hình; Sau khi lắp ghép hoàn thiện các khối của mô hình. Khi đó, các khối này được ghép lại với nhau để có thể thực hiện được yêu cầu công việc của mô hình; Thực hiện điều chỉnh biến trở để điều khiển thời gian ép bánh phù hợp với điều kiện thực tế và đảm bảo các yêu cầu về thẩm mỹ, chất lượng và kinh tế. ☞

Sau khi cài đặt xong, ấn nút Start, khi đó hệ thống thực hiện một chu trình làm việc mới với các bước:

- Xilanh 1A (xilanh ép bánh) đi ra thực hiện ép phôi bánh;

- Thực hiện delay để đảm bảo các yêu cầu cho quá trình tạo biên dạng bánh;

- Xilanh 1A đi về;

- Xilanh 2A (xilanh tách phôi) thu về, để tách phôi ra khỏi khuôn bánh;

- Delay để đảm bảo hoàn thành quá trình tách phôi;

- Xilanh 2A đi ra, bắt đầu 1 chu trình mới bằng việc chờ tín hiệu đầu vào từ nút start;

- Hoàn thiện lắp ghép mô hình và bố trí thiết bị trên mô hình, chạy thử mô hình ổn định.

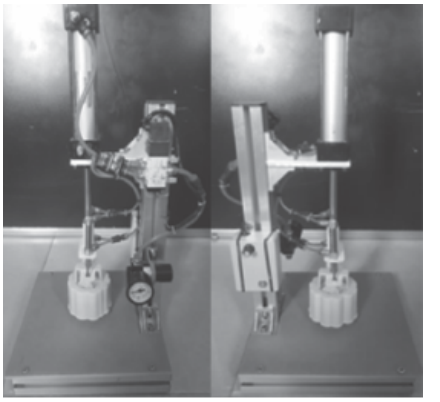
4. KẾT LUẬN

Từ những khả năng cùng với những tiện ích, hiệu quả của vi điều khiển và yêu cầu bài toán của đề tài, tác giả chọn Arduino nano R3 để điều khiển thực nghiệm. Giải quyết bài toán lập trình điều khiển và mô phỏng hoạt động của mô hình máy ép bánh. Với sự trợ giúp của phần mềm thiết kế Inventor mô hình máy ép bánh trung thu dùng vi điều khiển đã được tác giả thiết kế hoàn chỉnh và tiến hành chế tạo thành công.

Khảo sát thực nghiệm các thông số hoạt động của sản phẩm.

Đánh giá các kết quả khảo sát thực tế với mô hình trên phòng thí nghiệm. Mạch chạy ổn định, chạy đúng theo sơ đồ nguyên lý. Mạch điện không quá phức tạp, bảo đảm sự an toàn sử dụng. Giá thành rẻ.

Mô hình này đáp ứng được những yêu cầu thực tiễn, có thể ứng dụng trong đào tạo sinh viên hệ đại học chính quy thuộc các chuyên ngành chế tạo máy, cơ điện tử và các chuyên ngành liên quan.



Hình 9. Mô hình tổng thể máy ép bánh trung thu

Ngày nhận bài: **10/5/2025**
Ngày phản biện: **15/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Trịnh Chất, Lê Văn Uyển, "*Tính toán thiết kế hệ dẫn động cơ khí – Tập 1*". NXB. Giáo dục, 2000.
[2]. Trương Minh Trí, Phạm Quang Huy, "*Thiết kế cơ khí với Autodesk Inventor*". NXB. Giáo dục, 2000.
[3]. Phạm Đắc, Trần Xuân Tùy, "*Điều khiển tự động trong các lĩnh vực cơ khí*". NXB. Giáo dục, 1998.
[4]. Nguyễn Doãn Phước, "*Lý thuyết điều khiển tuyến tính*". NXB. Khoa học Kỹ thuật, 2002.
[5]. Trần Doãn Tiến, "*Tự động điều khiển các quá trình công nghệ*". NXB. Giáo Dục, 1998.
[6]. Phan Văn Hiếu, "*Thiết kế, chế tạo mô hình máy đóng dấu dùng vi điều khiển Arduino nano*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 1+2 năm 2020.

THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA TỶ LỆ TUẦN HOÀN KHÍ THẢI (%EGR) ĐẾN CÁC CHỈ TIÊU KINH TẾ, NĂNG LƯỢNG, MÔI TRƯỜNG CỦA ĐỘNG CƠ DIESEL HYUNDAI D4CB 2.5 TCI-A

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE IMPACT OF EXHAUST GAS RECIRCULATION (EGR) RATE ON ECONOMIC, ENERGY, AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE HYUNDAI D4CB 2.5 TCI-A DIESEL ENGINE

Trần Trọng Tuấn[1,*], Nguyễn Hoàng Vũ[2], Vũ Ngọc Khiêm[1]
[1]Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[2]Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn
**Email: tuantt@utt.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ khí thải tuần hoàn (%EGR) đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng, môi trường của động cơ diesel Hyundai D4CB 2.5 TCI-A (4 kỳ, 4 xi lanh, phun nhiên liệu kiểu CommonRail, tăng áp tua bin khí thải VGT có làm mát khí nạp, sử dụng hệ thống EGR áp suất cao). Thử nghiệm được thực hiện trên hệ thống thiết bị đồng bộ và hiện đại của hãng AVL, kết hợp với bộ điều khiển ECU mở của hãng Woodward (MotoHawk 0565-128). Các chỉ tiêu được đánh giá bao gồm: suất tiêu hao nhiên liệu, mô men xoắn và hàm lượng các chất ô nhiễm chính trong khí thải (NOx, CO, HC, PM). Kết quả cho thấy khi tăng % EGR đến ngưỡng tối ưu (khoảng 20÷25%), lượng NOx giảm đáng kể (lên đến 56,4%), tuy nhiên kèm theo là sự gia tăng của các chất ô nhiễm khác (CO, HC và PM); suất tiêu hao nhiên liệu chỉ bị ảnh hưởng nhẹ (giảm khoảng 3,2%). Kết quả nghiên cứu cung cấp đánh giá định lượng, với độ tin cậy cao về ảnh hưởng của %EGR, đồng thời là cơ sở để điều khiển %EGR phù hợp khi thay đổi quy luật cung cấp nhiên liệu (với các chiến lược phun khác nhau), loại nhiên liệu sử dụng (biodiesel B10, B20).

Từ khóa: *Tuần hoàn khí thải (EGR); Động cơ diesel Hyundai D4CB; Suất tiêu hao nhiên liệu; Phát thải NOx, CO, HC, PM.*

ABSTRACT

This paper presents experimental results evaluating the impact of exhaust gas recirculation (EGR) rate on the economic, energy, and environmental performance indicators of the Hyundai D4CB 2.5 TCI-A diesel engine (four-stroke, four-cylinder, Common Rail fuel injection, variable geometry turbocharger with intercooler, equipped with a high-pressure EGR system). The experiments were conducted using a modern, fully integrated test system from AVL, combined with an open ECU from Woodward (MotoHawk 0565-128). The evaluated parameters include brake specific fuel consumption, engine torque, and the concentrations of major exhaust pollutants (NOx, ☞

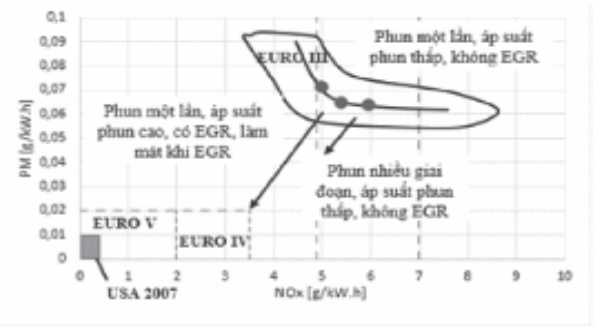
CO, HC, and PM). The results show that increasing the EGR rate to an optimal range (approximately 20÷25%) leads to a significant reduction in NOx emissions (up to 56.4%), but is accompanied by increases in other pollutants (CO, HC, and PM). Fuel consumption is only slightly affected, with a reduction of about 3.2%. The study provides a quantitative and highly reliable assessment of the influence of EGR rate and serves as a basis for appropriately controlling EGR under varying fuel injection strategies and fuel types, such as biodiesel blends (B10, B20).

Keywords: *Exhaust gas recirculation (EGR); Hyundai D4CB diesel engine; Brake specific fuel consumption (BSFC); NOx, CO, HC, PM emissions.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tuần hoàn khí thải (EGR) là giải pháp đưa một phần khí thải quay trở lại đường nạp của động cơ nhằm làm giảm nồng độ ôxy của khối khí nạp mới, từ đó hạ thấp nhiệt độ và áp suất cực đại trong buồng cháy, giúp giảm đáng kể lượng khí NOx thải ra, [1], [2].

Hệ thống EGR cần được trang bị trên động cơ để đáp ứng các tiêu chuẩn ô nhiễm từ Euro 3 trở đi, [4]. Tiêu chuẩn Euro 6 được áp dụng từ năm 2015 với giới hạn nghiêm ngặt về mức phát thải NOx, PM, CO và HC, đặc biệt là xe lắp động cơ diesel. So với Euro 5, Euro 6 giảm đến 67% mức phát NOx cho phép đối với Phương tiện cơ giới đường bộ (PTCGĐB) hạng nhẹ và 37% đối với động cơ diesel trên PTCGĐB nặng, [3]. Để đáp ứng Euro 6, các nhà sản xuất ô tô phải sử dụng đồng thời các công nghệ như bộ lọc chất thải dạng hạt (DPF), hệ thống khử NOx kiểu xúc tác chọn lọc (SCR), cải tiến quy luật cung cấp nhiên liệu và làm mát khí EGR, [3]. Năm 2016, Hội đồng quốc tế về Giao thông sạch (ICCT) đưa ra bản tóm tắt kỹ thuật về tiêu chuẩn khí thải Euro 6, [3] trong đó nhấn mạnh về vai trò của EGR trong việc kiểm soát NOx. Việc sử dụng EGR kết hợp với bộ xử lý khí thải kiểu SCR sẽ giúp động cơ đạt được ngưỡng phát thải NOx của Euro 6. Vai trò của EGR trong việc đáp ứng các tiêu chuẩn Euro được trình bày trên Hình 1, [4], cho thấy, để động cơ diesel có thể đạt được tiêu chuẩn khí thải từ Euro 3 trở lên thì không thể thiếu hệ thống EGR.



Hình 1. Vai trò của EGR trong việc đáp ứng các tiêu chuẩn khí thải [4].

Mặc dù EGR giúp giảm NOx hiệu quả, nhưng cũng ảnh hưởng mạnh đến suất tiêu hao nhiên liệu động cơ. Khi tăng tỷ lệ khí EGR (%EGR), sẽ làm tăng phát thải CO, HC và PM, [1]. Do đó, việc điều khiển % EGR tối ưu là rất quan trọng để để đảm bảo sự cân bằng, thỏa hiệp giữa mức phát thải NOx, các chất ô nhiễm khác và suất tiêu hao nhiên liệu. Động cơ diesel hiện đại sử dụng hệ thống EGR điều khiển điện tử để kiểm soát chính xác lượng khí EGR nhằm điều chỉnh kịp %EGR phù hợp với chế độ vận hành, [2]. Làm mát khí EGR trước khi đưa vào đường nạp là một biện pháp hiệu quả nhằm đạt được các mục tiêu, [2].

Hountalas, [5], đã nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ và %EGR đến chỉ tiêu kinh tế và mức phát thải của động cơ diesel phun nhiên liệu trực tiếp lắp trên xe tải hạng nặng

thông qua thực nghiệm trên bệ thử với chế độ làm việc là 100% tải, tại n = 1130 vg/ph và n = 1420 vg/ph, nhiệt độ khí EGR thay đổi từ 90÷240 °C. Kết quả cho thấy, nếu nhiệt độ khí EGR cao sẽ ảnh hưởng xấu đến hiệu suất nhiệt, làm tăng phát thải PM. Xuexuan Nie và công sự đã thử nghiệm trên động cơ diesel 4 kỳ 4 xi lanh, tăng áp tua bin khí thải có làm mát khí tăng áp, dùng hệ thống phun nhiên liệu kiểu CommonRail, sử dụng các bộ xử lý khí thải DOC, DPF và SCR, hệ thống EGR kiểu áp suất cao [1]; cho thấy, sự kết hợp tốt giữa %EGR và SCR có thể đưa mức phát thải NOx về bằng 0 khi động cơ làm việc ở n = 1600 vg/ph, tại 100% tải.

Việc nghiên cứu về EGR trên động cơ diesel phun nhiên liệu điều khiển điện tử đã được nhóm tác giả bài báo thực hiện từ năm 2014, với một số công trình đã công bố, [6], [7], [8]. Trong công trình [6], đã sử dụng phần mềm AVL Boost để đánh giá ảnh hưởng của %EGR đến chỉ tiêu kỹ thuật và môi trường của động cơ diesel một xi lanh dùng hệ thống phun nhiên liệu kiểu cơ khí, cho thấy, với %EGR = 15÷20% ở n = 2400 vg/ph và n = 2600 vg/ph, tại 100% tải, có thể giảm từ 80÷90% phát thải NOx nhưng phát thải PM tăng khoảng 4÷6 lần so với khi không sử dụng EGR, [6]. Trong công trình [7], đã nghiên cứu thực nghiệm xác định các thuộc tính hóa - lý của dòng khí EGR (nhiệt độ, áp suất, hơi nước, CO_2) khi động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A sử dụng các loại nhiên liệu khác nhau (diesel B0 và biodiesel B10, B20) ở n = 1750 vg/ph. Trong công trình [8], đã nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định đặc điểm điều khiển, vận hành hệ thống EGR (độ rộng xung đóng/mở van EGR, %EGR, hàm lượng ôxy...) của động cơ D4CB 2.5 TCI-A khi làm việc ở các chế độ tải và tốc độ khác nhau, sử dụng ECU điều khiển nguyên thủy của động cơ; kết quả cho thấy, ở tốc độ n = 2000 vg/ph thì %EGR đạt giá trị lớn nhất, vào khoảng 20%.

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của %EGR đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A lắp trên xe Hyundai Starex, trên hệ thống thiết bị thử nghiệm hiện đại, đồng bộ của Hãng AVL, [9], kết hợp với ECU mở của hãng WoodWard (MotoHawk 0565-128), [10].

2. ĐỐI TƯỢNG, TRANG THIẾT BỊ NGHIÊN CỨU; LOẠI NHIÊN LIỆU SỬ DỤNG

2.1. Đối tượng nghiên cứu

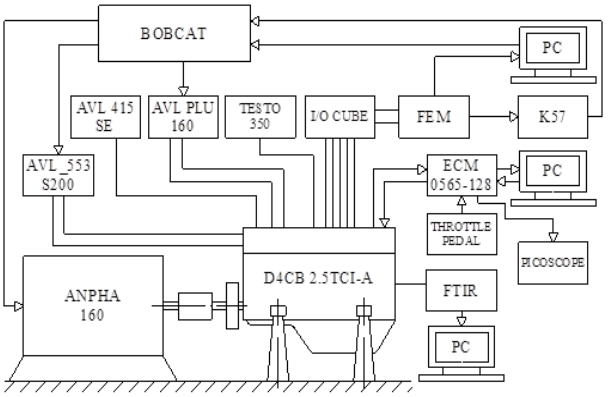
Động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A (lắp trên xe Hyundai Starex) là động cơ 4 kỳ, 4 xi lanh, dùng hệ thống phun nhiên liệu kiểu CommonRail (CR), tăng áp tua bin khí thải VGT có làm mát khí tăng áp, dùng hệ thống EGR kiểu áp suất cao có làm mát khí EGR với van EGR điện từ được điều khiển trực tiếp từ ECU, với các thông số được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật chính của động cơ D4CB 2.5 TCI-A, [7].

STT	Thông số	Giá trị
1	Kiểu động cơ	4 kỳ, 4 xi lanh, 1 hàng
2	Đường kính xi lanh (D) x Hành trình pít tông S (mm)	91 x 96
3	Tỷ số nén	17,6
4	Hệ thống phun nhiên liệu kiểu CR (CP1-H)	Áp suất phun lớn nhất là 1600 bar; vòi phun CR kiểu điện từ
5	Hệ thống tăng áp	Tua bin khí xả (VGT), có làm mát khí tăng áp
6	Hệ thống EGR	Áp suất cao, có làm mát khí EGR
7	Tiêu chuẩn khí thải	Euro 3

2.2. Trang thiết bị thử nghiệm

Quá trình nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trên bệ thử động cơ thuộc Trung tâm Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, sử dụng hệ thống thiết bị thử nghiệm hiện đại, đồng bộ của Hãng AVL với sơ đồ bố trí các trang thiết bị chính được trình bày trên Hình 2.



Hình 2. Bố trí trang thiết bị thử nghiệm, [8],[9], [11]. Alpha 160 - Phanh điện; AVL-553S-200 - Hệ thống kiểm soát nhiệt độ nước làm mát; AVL PLU 160 - Thiết bị đo lượng nhiên liệu tiêu thụ; Bobcat - Hệ thống tự động hóa thiết bị đo và bệ thử; I/O Cube - Hộp nối cáp tín hiệu từ các cảm biến; FEM - Bộ chuyển đổi tín hiệu; K57 - Bảng điều khiển trung tâm; ECM 556-128 - ECU mở WoodWard/ Motohawk dùng để điều khiển động cơ D4CB 2.5 TCI vận hành theo yêu cầu nghiên cứu; Throttle pedal - Bàn đạp ga của D4CB 2.5 TCI; FTIR - Hệ thống thiết bị phân tích khí thải của AVL; AVL 415SE - Thiết bị đo PM; PC - Máy tính; Testo 350 - Thiết bị đo lưu lượng khí EGR; Picoscope - Thiết bị đo đặc tính tín hiệu điều khiển từ ECU.

2.3. Chế độ vận hành, loại nhiên liệu sử dụng

Quá trình thử nghiệm được tiến hành theo trình tự như sau:

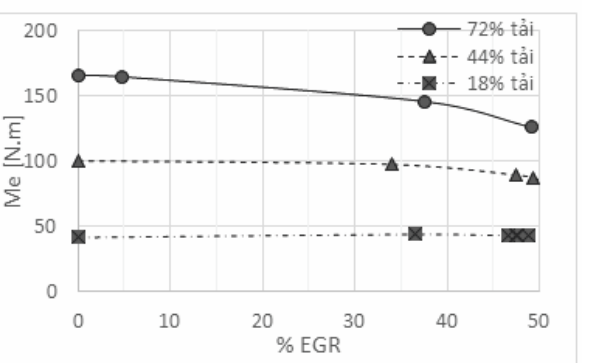
(1) Đo các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ D4CB 2.5 TCI-A khi vận hành theo đặc tính ngoài, sử dụng ECU mở MotoHawk ECM 556-128 [10], là sản phẩm của đề tài NCKH & PTCN cấp Quốc gia, [11]; ECM 556-128 cho phép điều khiển động cơ D4CB 2.5 TCI-A theo chế độ thử cần thiết lập (lượng phun, áp suất phun nhiên liệu; thời gian mở van EGR…);

(2) Đánh giá ảnh hưởng của %EGR đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ tại các chế độ tải khác nhau, ở n = 2000 vg/ph (vùng tốc độ thấp của động cơ, có %EGR là lớn nhất, [8]); ECM 556-128 sẽ điều khiển độ mở van EGR theo yêu cầu nghiên cứu. %EGR được xác định thông qua kết quả đo lưu lượng dòng khí EGR và lưu lượng của dòng khí nạp.

3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

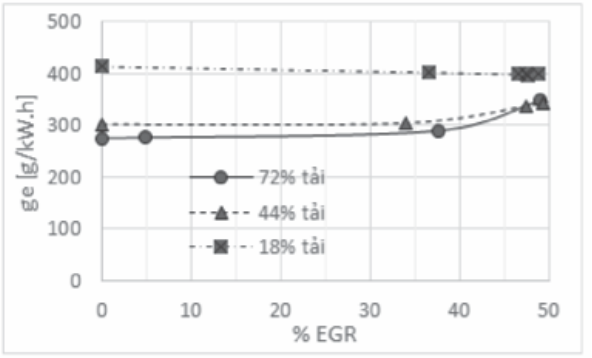
3.1. Mô men, suất tiêu thụ nhiên liệu

Ảnh hưởng của %EGR đến mô men (M_e, N.m), suất tiêu hao nhiên liệu (g_e, g/kW.h) khi vận hành tại các chế độ tải khác nhau, tại n = 2000 vg/ph được trình bày trên Hình 3 và Hình 4. Ta thấy:

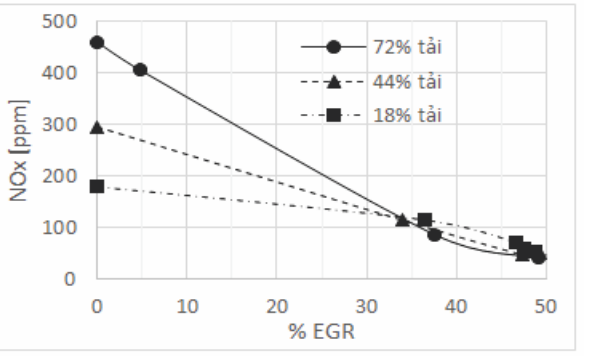


Hình 3. Ảnh hưởng của %EGR đến M_e

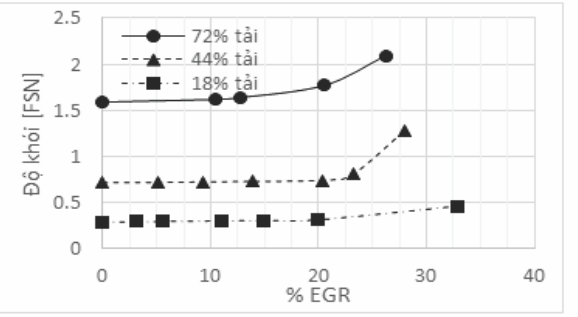
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



Hình 4. Ảnh hưởng của %EGR đến g_e



Hình 5. Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải NOx



Hình 6. Ảnh hưởng của %EGR đến độ khói

- Tại chế độ tải nhỏ và tải trung bình, khi %EGR nhỏ hơn 40% thì g_e tăng không quá nhiều (dưới 3%); M_e ít thay đổi khi tăng %EGR (nhất là tại chế độ tải nhỏ). Điều này có thể giải thích là do ở chế độ tải thấp và trung bình, hệ số dư lượng không khí và hàm lượng ôxy trong hỗn hợp khí nạp lớn nên có thể mở rộng được %EGR mà không làm ảnh hưởng nhiều đến g_e;

- Tại chế độ tải cao, trong dải %EGR nhỏ hơn 35% thì không có sự thay đổi nhiều về g_e khi tăng %EGR. Tuy nhiên, nếu % EGR vượt quá 35% sẽ có sự gia tăng mạnh về g_e.

Như vậy, nếu xét về chỉ tiêu kinh tế thì tại n = 2000 vg/ph, %EGR hợp lý nên dưới 35%.

3.2. Phát thải các chất ô nhiễm

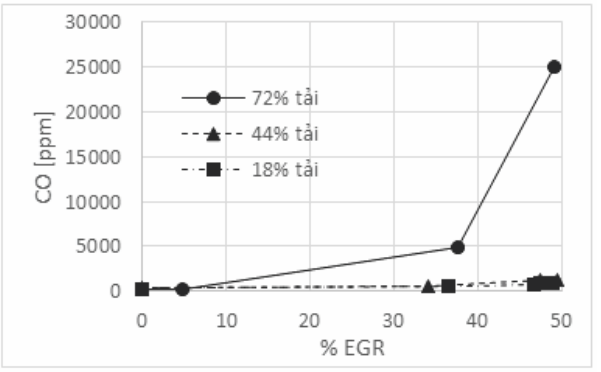
Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải NOx (ppm) và độ khói (FSN), khi vận hành tại các chế độ tải khác nhau, tại n = 2000 vg/ph được trình bày trên Hình 5 và Hình 6. Ta thấy:

- Khi tăng %EGR, hàm lượng NOx giảm mạnh (mức giảm lớn nhất từ 39,2 đến 89,15% tùy thuộc vào chế độ tải và tốc độ), nguyên nhân là do khi tăng %EGR làm giảm nồng độ ôxy, giảm nhiệt độ cực đại trong buồng cháy, [1], [2], [7];

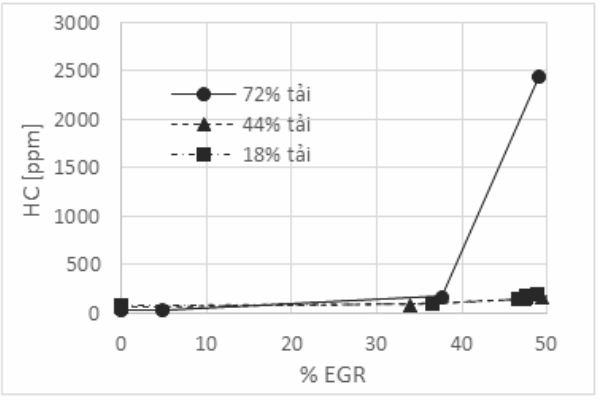
- Tại chế độ tải thấp và trung bình, khi tăng %EGR thì độ khói tăng không nhiều do ở những chế độ này nồng độ ôxy trong hỗn hợp khí nạp là lớn;

- Tại một chế độ vận hành nhất định sẽ tồn tại một giá trị %EGR giới hạn khi xem xét về độ khói (khi %EGR vượt quá giá trị giới hạn này sẽ có sự tăng mạnh về độ khói). Giá trị %EGR giới hạn này ở chế độ tải thấp và trung bình có thể lên đến 25÷35%, ở các chế độ tải cao có xu hướng giảm xuống còn khoảng từ 20÷25%. ☞

Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải CO (ppm) và HC (ppm) khi vận hành tại các chế độ tải khác nhau ở n = 2000 vg/ph được trình bày trên Hình 7 và Hình 8. Ta thấy:



Hình 7. Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải CO



Hình 8. Ảnh hưởng của %EGR đến phát thải HC

- Mức phát thải CO và HC khi không có EGR (%EGR = 0) là tương đối thấp (khoảng 300 ppm đối với CO và khoảng 75 ppm đối với HC);

- Ở chế độ tải thấp và tải trung bình, mức phát thải CO và HC tăng không nhiều khi %EGR dưới 20%. Tuy nhiên, nếu %EGR vượt quá 20% thì phát thải CO và HC có xu hướng tăng rất mạnh, cho thấy chất lượng quá trình cháy có xu hướng giảm nhanh khi tăng %EGR ở chế độ tải cao.

4. KẾT LUẬN

Đã đánh giá được chi tiết, lượng hóa ảnh hưởng của %EGR đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ diesel D4CB 2.5 TCI-A ở các chế độ tải điển hình, tại n = 2000 vg/ph với các trang thiết bị nghiên cứu đồng bộ, hiện đại.

Kết quả thực nghiệm cho thấy, hoàn toàn có thể lựa chọn được một khoảng giá trị của %EGR nhằm đảm bảo sự thỏa hiệp, cân bằng giữa các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng và môi trường của động cơ. Ngoài ra, các giá trị %EGR giới hạn khi xem xét theo mức phát thải PM, CO, HC có xu hướng nhỏ hơn giá trị %EGR giới hạn khi xem xét theo suất tiêu hao nhiên liệu và mô men xoắn của động cơ.

Ngoài việc đánh giá lượng hóa ảnh hưởng của %EGR, kết quả nghiên cứu còn là cơ sở để xây dựng MAP điều khiển %EGR phù hợp cho động cơ D4CB 2.5 TCI-A (với ECM MotoHawk 0565-128) trên toàn vùng làm việc, khi có sự cải tiến về quy luật cung cấp nhiên liệu (phun nhiều giai đoạn với các chiến lược phun khác nhau) và thay đổi loại nhiên liệu sử dụng (B10, B20), [11].❖

Ngày nhận bài: **02/5/2025**
Ngày phản biện: **16/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Xuexuan Nie et al, "*Experimental Study on NOx Reduction of Diesel Engine by EGR Coupled with SCR*". ACS Omega 2024, 9, 8308-8319. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09052

[2]. Xinmei Chen, "*Research on Electronic Controlled EGR System of Diesel Engine*". 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC 2016).

[3]. International Council on Clean Transportation, "*Briefing: A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards*", June 2016.

[4]. Raffael Schubiger, Andrea Bertola, "*Influence of EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines Equipped with CommonRail Injection Systems*". SAE 2001-01-3497.

[5]. Hountalas, "*Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rate on heavy duty DI diesel engine performance and emission*". Energy 33 (2008) 272-283.

[6]. Trần Trọng Tuấn, Vũ Ngọc Khiêm, Nguyễn Hoàng Vũ, "*Đánh giá ảnh hưởng của việc tuần hoàn khí thải (EGR) đến các chỉ tiêu kinh tế, năng lượng, môi trường của động cơ diesel*". Tạp chí Giao thông vận tải (ISSN 0866-7012), 4/2014, tr.35-37.

[7]. Trần Trọng Tuấn, Khổng Văn Nguyên, Vũ Ngọc Khiêm, Nguyễn Hoàng Vũ, "*Nghiên cứu thực nghiệm xác định thuộc tính của dòng khí thải tuần hoàn (EGR) trên động cơ diesel khi sử dụng nhiên liệu biodiesel B10, B20*". Tạp chí Giao thông vận tải (ISSN 2354-0818), Tháng 4/2018, tr.103-107.

[8]. Trần Trọng Tuấn, Khổng Văn Nguyên, Vũ Ngọc Khiêm, Nguyễn Hoàng Vũ, "*Nghiên cứu đặc điểm làm việc của hệ thống EGR trên động cơ Hyundai 2.5 TCI-A bằng thực nghiệm*". Kỷ yếu Hội nghị KH&CN Giao thông vận tải lần thứ IV (ISBN 978-604-76-1578-0), ĐH Giao thông vận tải Tp. Hồ Chí Minh, tháng 5/2018, tr.376-383.

[9]. AVL List GmbH (2015), Technical Documents & Operating Manual for UTT Project.

[10]. https://mcs.woodward.com/support/wiki/index.php?title=MotoHawk

[11]. Nguyễn Hoàng Vũ, Báo cáo tổng kết Đề tài NCKH & PTCN cấp Quốc gia "*Nghiên cứu, chế tạo thử nghiệm ECU phù hợp cho việc sử dụng nhiên liệu diesel sinh học biodiesel với các mức pha trộn khác nhau*", mã số ĐT.08.14/NLSH (thuộc Đề án Phát triển Nhiên liệu sinh học đến năm 2015, tầm nhìn đến năm 2025).

TÍNH TOÁN, MÔ PHỎNG BIẾN DẠNG VÀ LỰC TÁC ĐỘNG LÊN VỎ MÁY BIẾN ÁP CÔNG SUẤT LỚN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

COMPUTATION, SIMULATION OF DEFORMATION AND STRESS ACTING ON THE TANK OF POWER TRANSFORMERS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Nguyễn Vũ Cường[1], Phạm Minh Hiếu[1], Đỗ Đức Thành[2], Phạm Thị Tuyết Thanh[3], Đặng Quốc Vương[4]

[1]Tổng Công ty Thiết bị Điện Đông Anh

[2]Trường Đại học Mỏ - Địa chất

[3]Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

[4]Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Trong quá trình nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy biến áp (MBA) 500kV-3x300MVA, việc đánh giá ứng suất và biến dạng tác động lên vỏ MBA là yêu cầu kỹ thuật then chốt nhằm đảm bảo an toàn và độ tin cậy của MBA trong suốt quá trình vận hành. Trong bài báo này, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được áp dụng để tính toán và mô phỏng biến dạng của vỏ MBA đối với các trường hợp chịu áp lực bên trong (thử kín dầu) và chịu áp suất âm (quá trình hút chân không). Kết quả đạt được góp phần khẳng định độ an toàn của thiết kế và công nghệ chế tạo MBA công suất lớn, điện áp cao do Việt Nam làm chủ.

Từ khóa: *Máy biến áp 500kV; Mô phỏng biến dạng; Ứng suất; Thử kín dầu.*

ABSTRACT

During the research, design, and manufacturing process of the 500kV-3x300MVA transformer, evaluating the stress and deformation acting on the transformer tank is a key technical requirement to ensure operational safety and reliability. In this paper, a finite element method (FEM) is applied to calculate and simulate the deformation of the transformer tank under internal pressure (oil tightness testing) and negative pressure (vacuum drying process). The simulation results show that thereby confirming the structural safety and reliability of the high-capacity, high-voltage transformer design and manufacturing technology developed domestically in Vietnam.

Keywords: *500kV power transformer; Deformation simulation; Stress analysis; Oil pressure testing.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Máy biến áp (MBA) là một trong những thiết bị trọng yếu trong hệ thống điện quốc gia, đặc biệt, các MBA 500kV có vai trò then chốt trong việc kết nối các trung tâm phát điện lớn với các khu vực tiêu thụ. Việc đảm bảo chất lượng trong tính toán, thiết kế và chế tạo MBA ở cấp điện áp siêu cao áp 500kV là yếu tố tiên quyết để đảm bảo an toàn hệ thống, nâng cao độ tin cậy và kéo dài tuổi thọ vận hành của thiết bị. Tuy nhiên, quá trình chế tạo và thử nghiệm các MBA siêu cao áp cũng đặt ra nhiều thách thức kỹ thuật đối với các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước, đặc biệt là về độ bền cơ học của vỏ máy – bộ phận bao bọc và bảo vệ toàn bộ hệ thống điện – từ bên ngoài môi trường lẫn áp lực từ bên trong. Hiện nay, ở nước ngoài cũng có một số công trình nghiên cứu về MBA cao thế 110kV-220kV, cụ thể: Trong tài liệu [1], [2], bài báo đã sử dụng phần tử hữu hạn với mô hình 3D để nghiên cứu phản ứng cơ học của vỏ MBA ngâm dầu 360 MVA/220 kV dưới tác động của áp suất nội bộ. Trong tài liệu. [3-5], nhóm tác giả cũng nghiên cứu lực và ứng suất tác dụng lên dây quấn trong quá trình vận hành định mức và khi xảy ra sự cố ngắn mạch. Trong tài liệu [6-9] tính toán và phỏng sự phân bố của từ trường và lực tác động lên cuộn dây trong điều kiện ngắn mạch của MBA. Trong tài liệu [10], bài báo áp dụng phương pháp giải tích để tính toán lực và ứng suất tác động lên thanh kẹp mạch từ và đai dây quấn.

Trong các giai đoạn chế tạo và thử nghiệm như hút chân không (vacuum drying) hay thử kín dầu (pressure test), vỏ máy phải chịu các tải trọng cơ học rất lớn, có thể gây biến dạng, nứt hỏng hoặc phá hủy cục bộ nếu không được thiết kế và kiểm chứng chính xác. Trong bài báo này, phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng để tính toán, đánh giá, mô phỏng độ biến dạng của vỏ MBA do lực và ứng suất tác động lên vỏ MBA 500kV-3x300MVA với hai trường hợp vận hành điển hình: hút chân không và thử kín dầu.

2. MÔ HÌNH TOÁN

Sự biến dạng của MBA được mô hình hóa bởi các phương trình đạo hàm riêng: (i) phương trình cân bằng động (transient equilibrium equation), (ii) phương trình vật liệu (constitution equation), và (iii) phương trình tương thích (compatibility equation) [3]. Phương trình cân bằng động liên hệ giữa tải trọng và ứng suất được mô tả như sau [3], [4]:

$$\rho_t \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma_t = F_v \quad (1)$$

Trong đó: ρ_t (kg/m^3) là khối lượng riêng của vỏ thùng MBA, u (m) là véc tơ mô tả độ dịch chuyển khi xảy ra sự cố biến dạng, σ_t (N/m^2) là tensor ứng suất và F_v (N/m^3) là tổng lực tác động lên vỏ, lực này được xác định bằng tỉ số áp suất tác động lên thành vỏ MBA và chiều dày của vỏ MBA.

Phương trình vật liệu (liên hệ ứng suất-biến dạng) được biểu diễn theo định luật Duhamel-Hooke như sau [4], [10]:

$$\sigma_t - \sigma_0 = \mathbf{C}:\left(\varepsilon_t - \varepsilon_0 - \varepsilon_p - \varepsilon_{th}\right) \quad (2)$$

Trong đó: σ_0 và E_0 là ứng suất và biến dạng ban đầu, C là tensor đàn hồi bậc 4, E_p là biến dạng dẻo và E_{th} là biến dạng nhiệt (tuy nhiên, trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của E_{th} được bỏ qua).

Mối liên hệ giữa biến dạng và gradient của sự dịch chuyển vỏ MBA được mô tả thông qua phương trình tương thích, đó là [4], [10]: ☞

$$\epsilon = \frac{1}{2}[\nabla \mathbf{u} + (\nabla u)^T] \quad (3)$$

Phương trình (3) được định nghĩa tensor biến dạng theo gradient đối xứng của dịch chuyển.

3. MÔ PHỎNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ

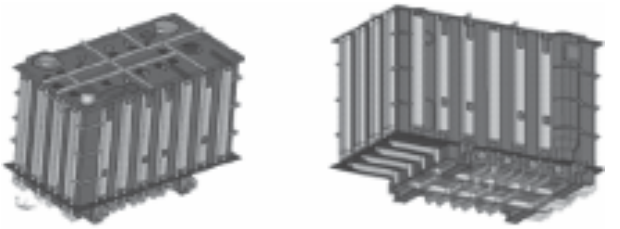
Trong phần này, bài báo sẽ tính toán mô phỏng lực và ứng suất tác dụng lên vỏ MBA cao thế 500kV, công suất 3x300MVA. Các thông số đầu vào để phục vụ công tác mô phỏng như sau: Sử dụng loại vật liệu, thép CT3; ứng suất đàn hồi: σ_y = 235 N/mm²; ứng suất bền: σ_t = 400-510 N/mm²; hệ số an toàn: K_{at} = 0,9, khi đó giới hạn ứng suất đàn hồi sẽ là: σ_y = 0,9 × 235 = 211.5 N/mm².

Hình 1 trình bày cấu trúc tổng thể của vỏ máy biến áp 500kV-3x300MVA, là cơ sở để thiết lập mô hình số trong phần mềm mô phỏng FEM. Các điều kiện tải: thử nghiệm chân không, áp lực lên thành vỏ máy F_{υ} = 0,1 N/mm², áp lực dầu với cột dầu cao 5m so với nắp máy, kích nâng thân máy (bao gồm cả ruột máy và dầu), với tải trọng do lực quán tính trong quá trình vận chuyển (tăng tốc theo chiều dọc và chiều ngang = 3g).

Lực và ứng suất tác động lên kết cấu vỏ MBA (hình 1) được mô phỏng với hai trường hợp vận hành điển hình:

- Trường hợp 1: Mô phỏng biến dạng và áp lực tác động lên vỏ máy trong quá trình hút chân không MBA.

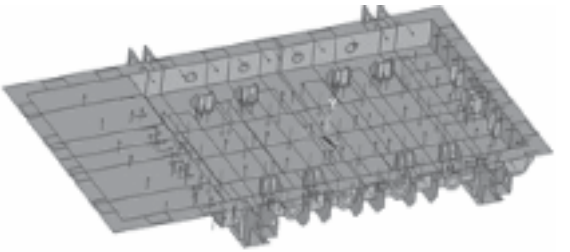
- Trường hợp 2: Mô phỏng biến dạng và ứng suất trên bề mặt vỏ máy trong trường hợp chịu áp lực dầu.



Hình 1. Kết cấu vỏ máy trong được sử dụng trong quá trình mô phỏng.

3.1. Mô phỏng biến dạng và áp lực tác động lên vỏ máy trong quá trình hút chân không MBA

Tải trọng cho vỏ thùng MBA là chân không hoàn toàn, có nghĩa là ứng suất đàn hồi σ_y = 0.1 N/mm². Trong điều kiện chân không, các điều kiện biên về việc cố định bằng các dầm đáy được áp dụng trong ba hướng của trục tọa độ X, Y, Z.

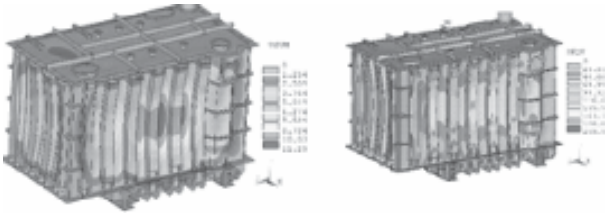


Hình 2. Phân bố áp lực tác động lên vỏ máy trong quá trình hút chân không.

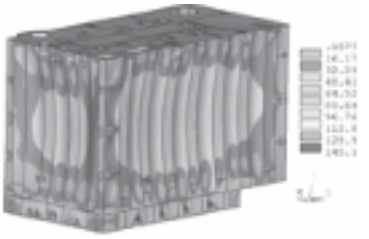
Hình 1 trình bày cấu trúc tổng thể của vỏ máy biến áp 500kV-3x300MVA, Hình 2 thể hiện phân bố áp lực đồng đều tác động lên vỏ máy trong điều kiện chân không tuyệt đối., Hình 3 (trái) cho thấy kết quả mô phỏng biến dạng của vỏ máy khi chịu tác động chân không. Biến dạng cực đại đạt 6.2 mm, chủ yếu tập trung tại khu vực giữa thân vỏ – nơi không có gân cứng. Mức độ biến dạng này vẫn nằm trong giới hạn cho phép, song gợi ý cần tăng cường độ cứng tại vị trí này để đảm bảo độ bền kết cấu. Hình 3 (phải) minh họa phân bố ứng suất theo tiêu chuẩn Von Mises khi chịu tải chân không. Giá trị ứng suất lớn nhất là 11.29 N/mm², phân bố

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

chủ yếu tại các vùng cong và điểm tiếp giáp, song vẫn thấp hơn đáng kể so với giới hạn cho phép, cho thấy kết cấu có khả năng ổn định tốt trước áp lực âm.



Hình 3. Kết quả mô phỏng biến dạng toàn vỏ máy trong quá trình hút chân không MBA (trái) và ứng suất theo tiêu chuẩn Von Mises phân bố trên thùng chứa khi hút chân không (N/mm²) (phải).

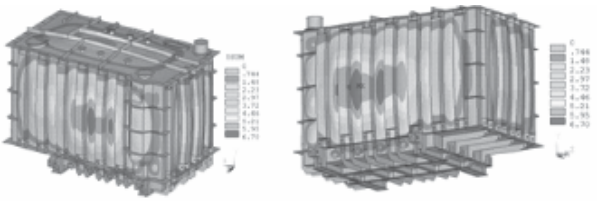


Hình 4. Mô phỏng ứng suất theo tiêu chuẩn Von Mises cho các bộ phận khác nhau của thùng chứa (bao gồm thành, nắp và đáy) khi hút chân không.

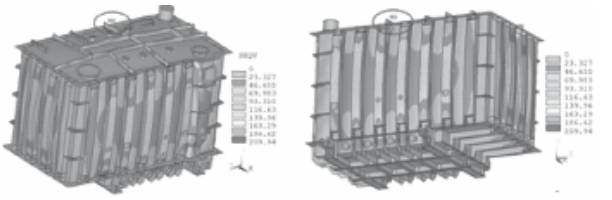
Hình 4 cung cấp chi tiết phân bố ứng suất Von Mises tại các bộ phận thành, nắp và đáy. Ứng suất lớn nhất lên tới 145.1 N/mm² và xuất hiện tại các góc giao kết cấu, đặc biệt tại vùng chân vỏ. Kết quả này cho thấy các khu vực tiếp giáp là điểm nhạy cảm về cơ học, cần chú trọng trong quá trình thiết kế và kiểm soát chất lượng mối hàn. Thông qua các kết quả đạt được, có thể thấy rằng biến dạng cực đại: 6.2 mm, xuất hiện tại vùng trung tâm các tấm thành bên không có gân cứng. Ứng suất lớn nhất: 173 MPa tại góc giao giữa thành và đáy.

3.2. Mô phỏng biến dạng và ứng suất trên bề mặt vỏ máy trong trường hợp chịu áp lực dầu

Vỏ máy được tính toán kiểm tra với áp lực tương đương một cột dầu cao 5m tính từ nắp máy. Áp lực được áp dụng dưới dạng áp suất thủy tĩnh lên các bộ phận của vỏ máy.



Hình 5. Mô phỏng Kết quả mô phỏng biến dạng toàn vỏ máy khi chịu áp lực dầu (mm).



Hình 6. Kết quả mô phỏng ứng suất trên vỏ máy khi chịu áp lực dầu (kết quả mô phỏng cho toàn bộ vỏ máy)(N/mm²).

Hình 5 mô phỏng biến dạng của vỏ máy khi chịu áp lực dầu thủy tĩnh tương đương cột dầu 5m. Biến dạng cực đại là 4.7 mm, chủ yếu tại khu vực đáy – vùng thường xuyên chịu tải trọng tập trung. Giá trị này nằm trong giới hạn thiết kế, song cũng nhấn mạnh vai trò của gân tăng cứng trong ổn định kết cấu. Hình 6 trình bày kết quả ứng suất phân bố toàn vỏ máy trong điều kiện chịu áp lực dầu. Ứng suất lớn nhất đạt 149 MPa, xuất hiện tại các mối hàn và khu vực quanh bu lông liên kết. Mặc dù chưa vượt quá giới hạn cho phép (211.5 MPa), nhưng kết quả này gợi ý cần tăng cường kiểm tra chất lượng hàn và thiết kế bu lông để tránh sự cố cục bộ.

Thông qua các kết quả đạt được, có thể thấy rằng biến dạng cực đại: 4.7 mm, xuất hiện tại vùng giữa đáy vỏ. Ứng suất lớn nhất: 149 MPa tập trung tại các mối hàn và khu vực gần bu lông liên kết. Thông qua cả hai trường hợp 1 và 2, ta nhận thấy rằng với vật liệu có giới hạn chảy 240 MPa và hệ số an toàn 0.9, ☞

ứng suất cho phép là 216 MPa. Các kết quả mô phỏng cho thấy mọi giá trị ứng suất đều nằm dưới ngưỡng này. Ứng suất tính toán tối đa trong các thành phần kết cấu ở các điều kiện tải khác nhau không vượt quá ứng suất cho phép và được đưa ra trong bảng 1 dưới đây:

Bảng 1. Ứng suất và độ biến dạng của vỏ máy với điều kiện thử nghiệm khác nhau: Hút chân không vỏ máy và thử áp lực dầu.

Điều kiện thử nghiệm	Độ biến dạng (mm)	Ứng suất (N/mm^2)	Ứng suất cho phép (N/mm^2)
Hút chân không vỏ máy ở 1 atm	11.29	209.9	$\sigma_{test} = 0.9 \times \sigma_y = 211.5$
Thử áp lực dầu	6.7	209.94	

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn đã cho thấy rằng vỏ máy biến áp 500kV - 3x300MVA do EEMC thiết kế hoàn toàn đáp ứng các tiêu chuẩn an toàn cơ học trong cả hai trường hợp tải trọng điển hình: hút chân không và thử kín dầu. Đặc biệt, các vùng tiếp giáp giữa thành, nắp và đáy được xác định là những điểm có nguy cơ tập trung ứng suất cao, cần được quan tâm trong thiết kế và kiểm tra kỹ thuật. Từ những kết quả thu được, nhóm tác giả kiến nghị mở rộng ứng dụng công nghệ mô phỏng số cho toàn bộ quá trình thiết kế – kiểm định thiết bị điện công suất lớn, đặc biệt đối với các thành phần cơ khí chịu ứng suất cao.

Lời cảm ơn:

Nội dung nghiên cứu của bài báo được hỗ trợ từ kết quả của đề tài cấp nhà nước mã số: DAĐL.CN-05/21.❖

Ngày nhận bài: **20/5/2025**
Ngày phản biện: **09/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Abi-Samra N, Arteaga J, Darovny B, Foata M, Herz J, Lee T, et al., "*Power Transformer Tank Rupture and Mitigation – A Summary of Current State of Practice and Knowledge by the Task Force of IEEE Power Transformer Subcommittee*". IEEE Trans. Power Delivery. 2009. October; 24: 1959-1967.

[2]. Yan, C. & Hao, Z. & Zhang, B. & Zheng, T. (2016), "*Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture*". 31. 180-187.

[3]. Hibbeler RC., "*Structure Analysis*". New Jersey: Englewood Cliffs; 2008.

[4]. B. Doan Thanh, "*Determination of winding destroy limit area for a power series of amorphous core transformers*". JMST, vol. 103, no. 103, pp. 11-21, May 2025.

[5]. B. D. Thanh, C. P. Do, H. D. Hoan and L. T. Hiep, "*Analysis of Current and Electromagnetic Force Acting on Winding in Cases of Short Circuits of Amorphous Transformer*". 2023 8th International Scientific Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), Danang, Vietnam, 2023, pp. 201-208.

[6]. T. Bao Doan and C. Phi Do, "*Calculation of the Magnetic Field and Inrush Current in a Three-phase Transformer*". 2020 Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB), Da Nang, Vietnam, 2021, pp. 94-99.

[7]. Thanh, B. D., Le, T. H., Quoc, V. D. (2024), "*A Comparative Analysis of Axial and Radial Forces in Windings of Amorphous Core Transformers*". International Journal of Engineering, 37(1), pp. 201-212. doi: 10.5829/ije.2024.37.01a.18.

[8]. Khrennikov, A & Aleksandrov, N.M.. (2019), "*Calculation of the electrodynamic forces causing deformation of the power transformer's windings*". E3S Web of Conferences. 124. 05020. 10.1051/e3sconf/201912405020.

[9]. Y. Zhai, R. Zhu, Q. Li, X. Wang, Y. Gu and S. Li, "*Simulation Research on Electrodynamic Force and Deformation of Transformer Windings under Short-circuit Condition*". 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1-4

[10]. Andrei Marinescu and Carmen Livia Ungureanu, "*About Axial Clamping force Mornitoring at Power Transformer Windings During Their Active LifeTime*". Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 32, 2008, pp. 56-61.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA ĐIỆN ÁP ĐÁNH LỬA (U) ĐẾN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT KHI XUNG THÉP C45 BẰNG ĐIỆN CỰC GRAPHIT TRÊN MÁY XUNG ĐỊNH HÌNH CNC (P26+E30) – MAXSEE

RESEARCH ON THE EFFECT OF IGNITION VOLTAGE (U) ON SURFACE ROUGHNESS WHEN PULSE CUTTING C45 STEEL WITH A GRAPHITE ELECTRODE ON CNC PULSE SHAPING MACHINE (P26+E30) – MAXSEE

PGS,TS. **Phan Văn Hiếu**
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email: hieu.phanvan@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về sự ảnh hưởng của điện áp đánh lửa (U) đến độ nhám bề mặt khi gia công tia lửa điện bằng phương pháp xung định hình thép C45 với điện cực Graphit trên máy xung định hình CNC (P26+E30) – MAXSEE (Đài Loan). Từ kết quả nghiên cứu xác định mối quan hệ giữa điện áp đánh lửa và độ nhám bề mặt của vật liệu thép C45 khi xung điện bằng điện cực Graphit, kết quả nghiên cứu có thể làm tài liệu tham khảo cho sinh viên, vận dụng làm bài thực hành tại xưởng CNC và đưa ra được quan điểm đánh giá ảnh hưởng của điện áp đánh lửa (U) đến độ nhám bề mặt để từ đó tìm ra giá trị điện áp đánh lửa tối ưu để đạt được độ nhám bề mặt mong muốn.

Từ khóa: *Độ nhám bề mặt; Xung định hình; Điện cực đồng; Điện áp đánh lửa; Thép C45.*

ABSTRACT

The paper presents the influence of the ignition voltage (U) on the surface roughness when machining electric spark by pulse forming method of C45 steel with Graphite electrode on CNC pulse forming machine (P26+E30) - MAXSEE (Taiwan). From the research results, the relationship between the ignition voltage and the surface roughness of C45 steel material when pulsing with Graphite electrode is determined. The research results can be used as reference material for students, applied in practice exercises at CNC workshops and provide a viewpoint to evaluate the influence of the ignition voltage (U) on the surface roughness to find the optimal ignition voltage value to achieve the desired surface roughness.

Keywords: *Surface roughness; Shaping pulse; Copper electrode; Ignition voltage; C45 steel.*

1. GIỚI THIỆU

Gia công điện cực định hình là phương pháp có nhiều lợi thế trong gia công các vật liệu dẫn điện có tính siêu cứng, siêu bền, các biên dạng có hình dáng phức tạp. Đây là loại hình gia công chiếm tỷ trọng lớn, được dùng rộng rãi trong số các phương pháp gia công không truyền thống, là gia công không có lực cắt, không phụ thuộc vào độ cứng của vật liệu, gia công định hình các bề mặt bậc cao, do đó nó đã làm thay đổi một số biện pháp gia công truyền thống khi chế tạo các cụm máy phức tạp.

Trong công nghệ gia công tia lửa điện (EDM), độ nhám bề mặt (Ra) là chỉ số quan trọng quyết định chất lượng và tuổi thọ chi tiết, đặc biệt với các chi tiết làm việc trong điều kiện ma sát, tải trọng lặp. Điện áp đánh lửa điều khiển trực tiếp năng lượng phóng điện mỗi xung, từ đó ảnh hưởng đến kích thước và độ sâu vết xói mòn trên bề mặt. Chưa có nhiều nghiên cứu chuyên sâu phân tích mối quan hệ định lượng giữa biến số điện áp đánh lửa (U) và độ nhám bề mặt (Ra) khi gia công thép C45 bằng điện cực Graphit trên máy xung CNC hiện đại. Đánh giá ảnh hưởng của điện áp đánh lửa (U) đến độ nhám bề mặt (Ra): Xác định mối quan hệ giữa điện áp đánh lửa và độ nhám bề mặt của vật liệu C45 khi xung điện bằng điện cực Graphit, sẽ góp phần nâng cao chất lượng chi tiết, đặc biệt là khi gia công vật liệu có độ cứng rất cao với hình dạng bề mặt phức tạp và giải quyết được tất cả các vấn đề nêu trên. Vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của điện áp (U) tới độ nhám bề mặt(Ra) khi gia công tia lửa điện bằng phương pháp xung định hình với thép C45 bằng điện cực Graphit, trở thành vấn đề cấp thiết.

• Cấu tạo của máy xung EDM

Máy xung định hình có 3 phần chính:

- Phần cơ khí (Khung máy tổng hợp; Thùng chất điện môi cho phôi; Bàn kẹp phôi; Hệ thống lắp điện cực và điện cực; Các bàn trượt và bàn quay để tạo các chuyển động cần thiết);

- Hệ thống tủ điện và điện tử điều khiển (Máy phát xung; Hệ thống điều khiển phóng tia lửa điện; Hệ thống điều khiển CNC);

- Cụm dung dịch điện môi.



Hình 1. Máy xung định hình CNC (P26-E30) – MAXSEE (Đài Loan)

2. MỐI QUAN HỆ GIỮA ĐIỆN ÁP ĐÁNH LỬA (U) VỚI ĐỘ NHÁM BỀ MẶT (RA) KHI GIA CÔNG TIA LỬA ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP XUNG ĐỊNH HÌNH VỚI THÉP C45, ĐIỆN CỰC GRAPHIT

2.1. Điều kiện thực nghiệm

Thí nghiệm trên máy xung định hình P26-E30- MAXSEE (Đài Loan) (Hình 1).

Điện cực bằng Graphit có có độ cứng từ 1¸2 (theo thang Mohs) và khối lượng riêng 2,09¸2,23 g/cm^3.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

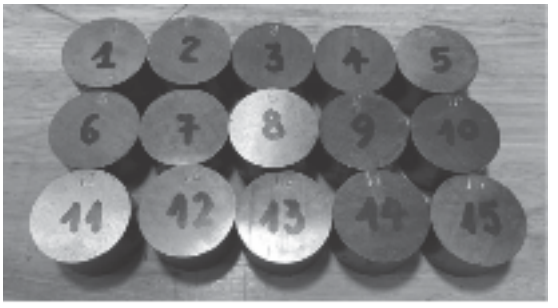
Thông số công nghệ gồm: t_{on} = 200µs; t_{off} = 100µs; khoảng lùi điện cực "Jdist = 0.3mm"; khe hở điện cực "Gad = 75µm"; Cường độ dòng xung "LVI = từ 6A đến 20A"; Thể tích vật liệu điện cực Anot bị ăn mòn = 480 mm^3 (cho tất cả các thí nghiệm).

Dung dịch điện môi là BP80.

Cường độ dòng điện được giới hạn trong khoảng 3A đến 30A.

Dòng xung LVI.

Vật liệu gia công, thép C45 là một loại thép carbon trung bình, có tỷ lệ carbon khoảng 0.45%. Các mẫu thép thí nghiệm (15 mẫu) được gửi đi đo độ nhám.



Hình 2. Mẫu phôi làm thí nghiệm

Phép đo độ nhám được thực hiện trên máy chuyên dùng CNC SJ-310 của hãng MITUTOYO- Nhật Bản (Hình 3).



Hình 3. Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ-310 Nhật Bản

Đặc tính kỹ thuật máy đo JC-310:

- Chiều dài cắt (λc): 2,5 mm;
- Dải đo ±360 µm;
- Độ phóng đại đồ thị: ×3;
- Tốc độ: 0.5mm/s khi đo;
- Tiêu chuẩn về độ nhám: JIS, DIN, ISO, ANSI.

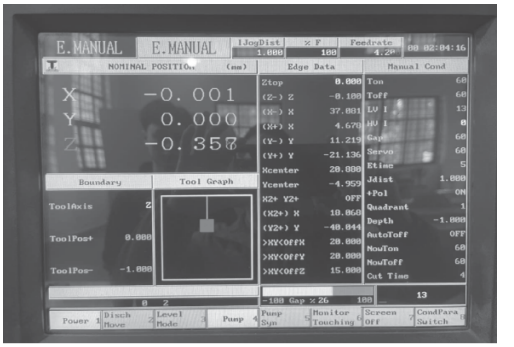
2.2. Tiến hành thực nghiệm



Gá đặt phôi làm thí nghiệm



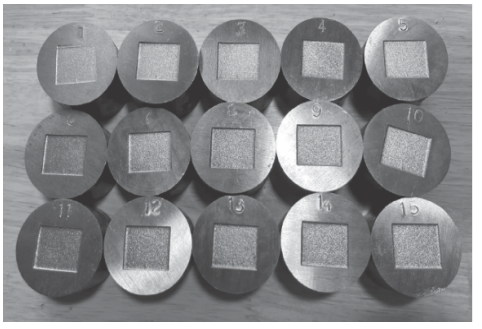
Lập trình gia công



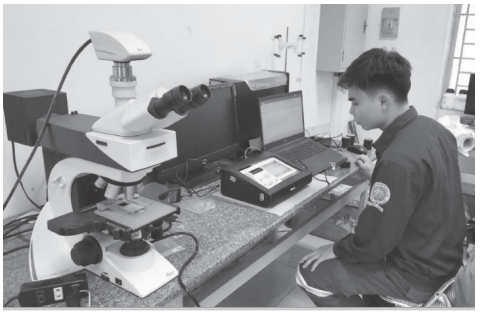
Chạy chương trình



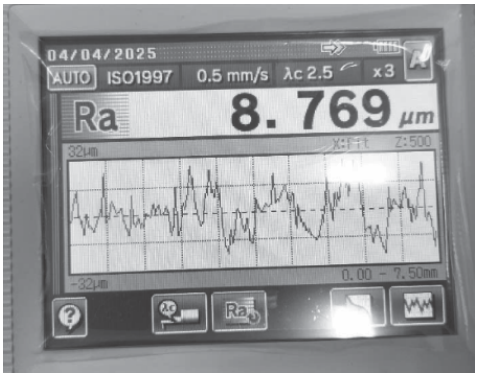
Kiểm soát quá trình gia công



Sản phẩm thí nghiệm



Đo kiểm sản phẩm thí nghiệm



Mẫu in kết quả của phép đo độ nhám

Hình 4. Các bước tiến hành thực nghiệm

Kiểm tra tình trạng máy, điện cực, phôi các đồ dùng liên quan… cho chạy rà 5 phút (cho hệ thống công nghệ ổn định) trước khi tiến hành thí nghiệm. Số lượng thí nghiệm: 15; thực nghiệm đo độ nhám Ra và kết quả.

Kết quả thí nghiệm các giá trị trong bảng 2.1.

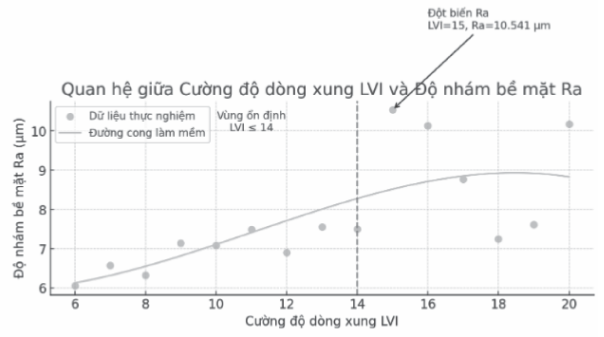
Bảng 2.1. Giá trị các yếu tố trong thực nghiệm

Thí nghiệm số	Cường độ dòng xung LVI	Độ nhám Ra (µm)
1	6	6.054
2	7	6.576
3	8	6.329
4	9	7.141
5	10	7.089
6	11	7.494
7	12	6.903
8	13	7.556
9	14	7.498
10	15	10.541
11	16	10.137
12	17	8.769
13	18	7.252
14	19	7.621
15	20	10.181

2.3. Xử lý kết quả thực nghiệm

Từ bảng tổng hợp trên (bảng 2.1) đưa ra biểu đồ quan hệ giữa tham số cường độ dòng xung LVI với độ nhám bề mặt Ra nhận được sau khi xung như sau:

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



Hình 5. Biểu đồ quan hệ giữa LVI và Ra

Xu hướng thay đổi của độ nhám bề mặt theo điện áp đánh lửa.

• Xu hướng tổng thể

Từ LVI = 6 đến 14, độ nhám Ra dao động nhẹ quanh mức trung bình, từ 6.054 µm đến 7.556 µm.

Giai đoạn này cho thấy mối quan hệ khá ổn định, chưa có sự biến thiên rõ rệt về độ nhám.

Điều này có thể được giải thích là do ở mức dòng xung thấp đến trung bình, năng lượng phóng điện chưa đủ lớn để gây ra sự thay đổi rõ rệt về chất lượng bề mặt gia công.

Từ LVI = 15 trở đi, độ nhám tăng đột ngột:

LVI = 15: Ra = 10.541 µm;
LVI = 16: Ra = 10.137 µm.

Sau đó, Ra có giảm nhẹ nhưng vẫn ở mức cao hơn so với giai đoạn đầu.

Đến LVI = 20, Ra lại tăng lên mức 10.181 µm.

• Xu hướng theo vùng giá trị LVI

Vùng LVI 6-14, Ra dao động nhẹ (6-7.5 µm) là giai đoạn ổn định, ít ảnh hưởng lớn đến độ nhám.

Vùng LVI 15-16, Ra tăng vọt lên trên 10 µm là xuất hiện bước nhảy lớn, dòng xung có thể gây nóng chảy cục bộ lớn hơn, tạo bề mặt gồ ghề.

Vùng LVI 17-20, Ra dao động mạnh, có giảm nhẹ nhưng vẫn cao hơn giai đoạn đầu, là cường độ cao tiếp tục gây biến dạng bề mặt mạnh hơn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Từ kết quả thực nghiệm và đo độ nhám bề mặt Ra, ta có nhận xét sau:

Nhận xét hiện tượng ảnh hưởng của điện áp đánh lửa đến độ nhám bề mặt:

Kết quả thí nghiệm cho thấy mối quan hệ giữa cường độ dòng xung (LVI) và độ nhám bề mặt (Ra) không tuyến tính, cụ thể:

Ở khoảng LVI từ 6 đến 14, độ nhám Ra dao động nhẹ trong khoảng từ 6.054 µm đến 7.556 µm. Giai đoạn này thể hiện sự ổn định tương đối trong quá trình gia công, chưa có sự thay đổi đột ngột về chất lượng bề mặt.

Từ LVI = 15 trở đi, Ra tăng mạnh và dao động ở mức cao hơn, có lúc đạt đến 10.541 µm (LVI = 15) và 10.181 µm (LVI = 20). Điều này cho thấy khi vượt qua một ngưỡng cường độ dòng xung nhất định, ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt trở nên rõ rệt.

Nguyên nhân chính được cho là do khi LVI tăng, năng lượng phóng điện giữa điện cực và chi tiết gia công cũng tăng, dẫn đến sự nóng chảy và bóc tách vật liệu mạnh hơn, gây ra các vết xói mòn sâu và rộng hơn trên bề mặt. ☞

Từ đó, ta có thể xác định vùng LVI tối ưu nên nằm trong khoảng 11-14, nhằm đảm bảo độ nhám bề mặt ở mức thấp và ổn định.

Nguyên nhân được giải thích như sau:

Điện áp đánh lửa là một trong những thông số công nghệ chính trong gia công tia lửa điện (EDM), có ảnh hưởng trực tiếp đến độ nhám bề mặt. Khi điện áp tăng:

Năng lượng phóng điện tăng, làm cho vật liệu bị nóng chảy và bốc hơi mạnh hơn.

Các vết xói mòn trên bề mặt to và sâu hơn, tạo ra bề mặt gồ ghề → độ nhám Ra tăng.

Dễ xảy ra hiện tượng bóc tách vật liệu không đồng đều, làm giảm chất lượng bề mặt.

Sự ổn định của quá trình phóng điện giảm, gây ra biến thiên lớn về Ra giữa các lần gia công.

Do đó, việc điều chỉnh hợp lý điện áp đánh lửa (cùng với LVI) là rất quan trọng để tối ưu hóa độ nhám và chất lượng bề mặt chi tiết sau gia công.

4. KẾT LUẬN

Qua quá trình nghiên cứu và thực nghiệm, bài báo đã đạt được các kết quả chính như sau:

1) Cường độ dòng xung (LVI) có ảnh hưởng đáng kể đến độ nhám bề mặt (Ra) trong gia công bằng tia lửa điện. Khi LVI tăng từ 6 đến 14, Ra dao động nhẹ trong khoảng 6.054 µm đến 7.556 µm. Tuy nhiên, từ LVI = 15 trở đi, Ra tăng đột ngột, có thể đạt tới 10.541 µm, cho thấy tác động mạnh của thông số này đến chất lượng bề mặt.

2) Điện áp đánh lửa đóng vai trò quan trọng trong việc xác định năng lượng phóng điện. Khi điện áp tăng, năng lượng xung tăng theo, dẫn đến sự bóc tách vật liệu mạnh hơn, gây ra các hố xói mòn sâu và rộng → làm tăng độ nhám bề mặt. Đồng thời, điện áp cao cũng làm giảm sự ổn định của hồ quang, ảnh hưởng đến tính đồng đều của bề mặt sau gia công.

3) Vùng giá trị LVI tối ưu nhằm đảm bảo độ nhám thấp nằm trong khoảng 11-14, giúp cân bằng giữa tốc độ bóc vật liệu và chất lượng bề mặt.

4) Nghiên cứu cũng đã chỉ ra rằng việc điều chỉnh hợp lý thông số công nghệ là rất quan trọng để đảm bảo hiệu quả gia công và chất lượng bề mặt sau cùng.

5) Đề xuất một số hướng nghiên cứu.

Để nâng cao chất lượng nghiên cứu và khả năng ứng dụng trong thực tiễn, tác giả đề xuất một số hướng nghiên cứu tiếp theo như sau:

Mở rộng phạm vi nghiên cứu bằng cách bổ sung thêm các thông số công nghệ khác như: thời gian xung (T_{on}), khoảng nghỉ (T_{off}), áp suất chất điện môi, tốc độ dịch chuyển điện cực.

Tăng số lượng mẫu thí nghiệm, từ đó cho phép xây dựng các mô hình toán học hoặc sử dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm (DOE) để xác định thông số tối ưu một cách hệ thống.

Ứng dụng mô phỏng số (FEM, CFD) để đánh giá ảnh hưởng của trường nhiệt, trường điện trong vùng phóng điện đến chất lượng bề mặt và tốc độ bóc vật liệu.

Đánh giá đa chỉ tiêu trong nghiên cứu chất lượng bề mặt, không chỉ dừng ở Ra mà còn mở rộng sang độ cứng, cấu trúc tế vi, độ dẫn điện, khả năng chống ăn mòn.

Thực hiện các thí nghiệm trong điều kiện sản xuất thực tế, nhằm kiểm nghiệm tính ổn định và khả năng mở rộng quy trình ra môi trường công nghiệp.❖

Ngày nhận bài: **06/6/2025**
Ngày phản biện: **13/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Trần Văn Địch (2016), "*Nghiên cứu độ chính xác gia công cơ khí bằng thực nghiệm*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[2]. Vũ Hoài Ân (2003), "*Gia công tia lửa điện*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[3]. Trần Văn Địch (2000), "*Công nghệ chế tạo máy CNC*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[4]. Trần Văn Địch, Ngô Trí Phúc, "*Sổ tay thép thế giới*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[5]. Tạ Ngọc Minh (2014), "*Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến chất lượng bề mặt trong gia công trên máy cắt dây tia lửa điện*". Luận văn cao học, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
[6]. Nguyễn Trọng Hùng, Phùng Xuân Sơn, "*Giáo trình thiết kế thực nghiệm trong chế tạo máy*". NXB. Xây dựng.
[7]. Nguyễn Hữu Lộc, "*Nghiên cứu tối ưu hóa các thông số công nghệ trong gia công EDM bằng phương pháp Taguchi*". Luận văn Thạc sĩ, Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, 2018.
[8]. Phạm Ngọc Tuấn, Nguyễn Văn Tường (2007), "*Các phương pháp gia công đặc biệt*". NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.

MÔ HÌNH HÓA ĐỘNG HỌC ROBOT TÁC HỢP GIA CÔNG CƠ KHÍ

KINEMATIC MODELING OF A COLLABORATIVE ROBOT IN MECHANICAL PROCESSING

Trần Minh Thúy
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Email:thuy.tranminh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Sự phát triển của sản xuất thông minh đã thúc đẩy việc ứng dụng robot trong gia công cơ khí như phay, mài, đánh bóng, v.v.. Ưu điểm của việc ứng dụng robot trong các quy trình công nghệ gia công là tính linh hoạt cao trong việc lập trình gia công; dễ dàng thay đổi cấu trúc để thích ứng với các thay đổi của đối tượng gia công; không gian làm việc lớn. Robot tác hợp là hệ gồm từ hai robot phối hợp tác công nghệ nên càng có khả năng linh hoạt cao. Một trong các vấn đề quan trọng khi sử dụng robot gia công là thiết kế quỹ đạo dựa trên việc tính toán động học. Đối với robot tác hợp cả robot mang đối tượng gia công và robot mang dụng cụ gia công cùng chuyển động nên việc tính toán động học là bài toán khá phức tạp. Bài báo trình bày phương pháp khảo sát động học hệ robot tác hợp gồm hai robot phối hợp thao tác gia công tạo hình bề mặt. Kết quả áp dụng mô phỏng hoạt động của robot thực hiện gia công mài bề mặt chi tiết hình côn để kiểm định tính đúng đắn của phương pháp.

Từ khóa: *Robot tác hợp; Động học; Gia công cơ khí.*

ABSTRACT

The development of smart manufacturing has promoted the application of robots in mechanical processing, including milling, grinding, and polishing. The advantages of applying robots in machining technology processes include high flexibility in machining programming, ease of changing the structure to adapt to changes in the machining object, and ample working space. A collaborative robot is a system consisting of two robots that coordinate technological cooperation, allowing for high flexibility. One of the key considerations when using a machining robot is designing the trajectory based on kinematic calculations. For collaborative robots, both the robot carrying the machining object and the robot holding the machining tool move together, making kinematic calculations quite complicated. The article presents a method for investigating the kinematics of a collaborative robot system consisting of two robots that coordinate surface shaping machining operations. The results of applying a simulation of the operation of the robot performing surface grinding machining of a conical part to verify the correctness of the method.

Keywords: *Collaborative robots; Kinematics; Mechanical processing.*

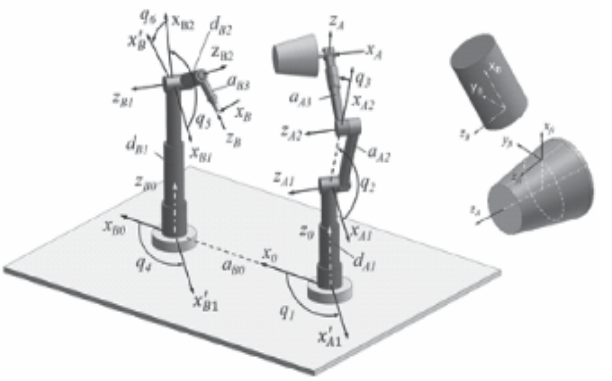
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ứng dụng robot trong gia công cơ khí ngày càng được quan tâm nghiên cứu và phát triển [1-5]. Trong [1] dẫn ra nhiều nghiên cứu và tiến bộ gần đây trong lĩnh vực gia công phay sử dụng robot, đặc biệt là đối với các chi tiết phức tạp. Trong [2] trình bày tổng hợp về ứng dụng của robot công nghiệp trong gia công cắt gọt, đặc biệt trong các lĩnh vực như mài, phay, đánh bóng và xử lý bề mặt. Một trong các vấn đề cần giải quyết khi sử dụng robot trong gia công cơ khí là thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot để robot thực hiện thao tác công nghệ. Trong các công trình [6-8] đã trình bày các phương pháp thiết kế đường dụng cụ cho robot. Cùng với việc thiết kế đường dụng cụ cho chuyển động của dụng cụ đối với chi tiết gia công, cần phải tính toán động học ngược để nhận được quy luật chuyển động của robot. Trong các công trình [9, 10] đã trình bày việc thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot gia công tạo hình bề mặt. Thông thường trong gia công cơ khí, đối tượng gia công thường gắn trên giá cố định hoặc thực hiện các chuyển động đơn giản như trong gia công tiện, mài,… Với gia công sử dụng máy CNC nhiều trục hoặc robot tác hợp, để gia công các bề mặt cong của chi tiết máy, chuyển động của dụng cụ và đối tượng gia công thường là các chuyển động không gian phức tạp. Khi đó, việc tính toán động học, thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot là khá phức tạp. Bài báo này trình bày phương pháp tính toán quỹ đạo chuyển động của robot tác hợp trong gia công cơ khí. Từ điều kiện thao tác công nghệ xác định chuyển động tương đối của dụng cụ đối với chi tiết gia công trong không gian động, bài báo dẫn ra phương pháp thiết lập phương trình động học robot tác hợp cho phép tính toán quy luật chuyển động của robot để nhận được chuyển động thao tác mong muốn. Bài báo trình bày một ví dụ áp dụng để minh họa và kiểm chứng.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC ROBOT TÁC HỢP

Hình 1 biểu diễn mô hình robot tác hợp là hệ gồm hai robot cấu trúc nối tiếp chuỗi hở, một robot kẹp chặt và di chuyển chi tiết gia công. Robot này đóng vai trò giống như bàn máy trong các máy công cụ, máy CNC, nên được gọi là robot bàn máy (A). Robot thứ hai kẹp chặt và di chuyển dụng cụ gia công, gọi là robot dụng cụ (B).

Quá trình gia công được thực hiện khi các robot chuyển động sao cho dụng cụ tiếp cận và tương tác thao tác công nghệ lên bề mặt chi tiết gia công phù hợp yêu cầu kỹ thuật gia công tương ứng.



Hình 1. Robot tác hợp gia công cơ khí

Cả hai robot đều có ba bậc tự do, ba khâu động, toàn khớp quay. Ký hiệu các khâu động của robot bàn máy là LA1, LA2, LA3; của robot dụng cụ là LB1, LB2, LB3.

Chọn hệ tọa độ cơ sở $x_0y_0z_0$ đặt tại gốc robot bàn máy. Các hệ tọa độ khâu của robot bàn máy lần lượt là $x_{A1}y_{A1}z_{A1}$, $x_{A2}y_{A2}z_{A2}$, với khâu cuối là $x_Ay_Az_A$. Các hệ tọa độ khâu của robot dụng cụ lần lượt là $x_{B1}y_{B1}z_{B1}$, $x_{B2}y_{B2}z_{B2}$, với khâu cuối là $x_By_Bz_B$. Hệ tọa độ gốc của robot dụng cụ ký hiệu $x_{B0}y_{B0}z_{B0}$.

Các hệ tọa độ được gắn vào các khâu dựa trên quy tắc Denavit-Hartenberg (DH).

Dưới đây trình bày việc khảo sát, tính toán động học robot tác hợp.

3. BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC ROBOT TÁC HỢP

Các hệ tọa độ được gắn vào các khâu của các robot theo quy tắc DH, các tham số động học được biểu diễn trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số động học DH của robot tác hợp

Robot bàn máy					**Robot dụng cụ**				
i-1/i	θ_i	d_i	a_i	α_i	i-1/i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	d_{A1}	0	-π/2	1	q_4	d_{B1}	0	-π/2
2	q_2	0	a_{A2}	0	2	q_5	0	0	π/2
3	q_3	0	a_{A3}	0	3(B)	q_6	d_{A3}	a_{A3}	-π/2
4(A)	-π/2	0	0	0					

Đối với robot bàn máy, hệ tọa độ khâu LA3 sau khi thực hiện các phép chuyển theo quy tắc DH, thực hiện thêm bước 4(A) để đưa đến hệ tọa độ $x_Ay_Az_A$, đặt tại tâm bàn kẹp. Hệ tọa độ $x_Ay_Az_A$ vừa biểu diễn vị trí và hướng khâu LA3 đối với hệ tọa độ cơ sở, đồng thời được dùng để biểu diễn đối tượng gia công, tức biểu diễn dạng hình học của đối tượng gia công trong $x_Ay_Az_A$.

Các ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất của robot bàn máy:

$$ {}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_{A1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; $$

$$ {}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a_{A2}\cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & a_{A2}\sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; $$

$$ {}^2A_A = \begin{bmatrix} \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & a_{A2}\cos q_3 \\ -\cos q_3 & \sin q_3 & 0 & a_{A2}\sin q_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; $$

Để tiện trình bày, gọi hệ $x_Ay_Az_A$ là hệ tọa độ bàn kẹp, tương ứng, ma trận biểu diễn hệ tọa độ bàn kẹp đối với hệ tọa độ cơ sở là:

$$ {}^0A_A = {}^0A_1\,{}^1A_2\,{}^2A_A \quad (1) $$

Các ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất của robot dụng cụ:

$$ {}^0B_{B0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{B0} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; $$

$$ {}^{B0}B_1 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_{B1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; $$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

$$^{1}B_{2}=\begin{bmatrix}\cos q_5 & 0 & \sin q_5 & 0\\ \sin q_5 & 0 & -\cos q_5 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix};$$

$$^{2}B_{B}=\begin{bmatrix}\cos q_6 & 0 & -\sin q_6 & a_{B3}\cos q_6\\ \sin q_6 & 0 & \cos q_6 & a_{B3}\sin q_6\\ 0 & -1 & 0 & d_{B3}\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix};$$

Để tiện trình bày, gọi hệ $x_By_Bz_B$ là hệ tọa độ dụng cụ, tương ứng, ma trận biểu diễn hệ tọa độ dụng cụ đối với hệ tọa độ cơ sở theo chuỗi động học robot dụng cụ là:

$$^{0}B_{B}=^{0}B_{B0}\,^{0}B_{1}\,^{1}B_{2}\,^{2}B_{B} \quad (2)$$

Hệ tọa độ dụng cụ thường gắn tại lưỡi cắt. Giả sử robot thực hiện quá trình gia công bề mặt cong bằng đá mài mặt đầu hình trụ. Hệ tọa độ dụng cụ được xác định sao cho: gốc tọa độ tại giao điểm của trục tâm đá mài với mặt phẳng đầu đá; trục x_B pháp tuyến mặt đầu của đá mài, trục z_B tiếp tuyến mặt đầu, trục y_B tạo thành hệ tọa độ thuận, xem Hình 1.

Gọi các thông số định vị hệ tọa độ dụng cụ $x_By_Bz_B$ đối với hệ tọa độ bàn kẹp $x_Ay_Az_A$ là x, y, z, α, β, η, ký hiệu:

$$\begin{cases}p=\left[x,y,z,\alpha,\beta,\eta\right]^T\\ \dot{p}=\left[\dot{x},\dot{y},\dot{z},\dot{\alpha},\dot{\beta},\dot{\eta}\right]^T\\ \ddot{p}=\left[\ddot{x},\ddot{y},\ddot{z},\ddot{\alpha},\ddot{\beta},\ddot{\eta}\right]^T\end{cases} \quad (3)$$

Ma trận biểu diễn hệ tọa độ $x_By_Bz_B$ đối với hệ tọa độ bàn kẹp $x_Ay_Az_A$ được ký hiệu là:

$$^{A}A_{B}=\begin{bmatrix}c_{11}(\alpha,\beta,\eta) & c_{12}(\alpha,\beta,\eta) & c_{13}(\alpha,\beta,\eta) & x\\ c_{21}(\alpha,\beta,\eta) & c_{22}(\alpha,\beta,\eta) & c_{23}(\alpha,\beta,\eta) & y\\ c_{31}(\alpha,\beta,\eta) & c_{32}(\alpha,\beta,\eta) & c_{33}(\alpha,\beta,\eta) & z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận biểu diễn hệ tọa độ dụng cụ đối với hệ tọa độ cơ sở theo chuỗi động học robot bàn máy là:

$$^{0}A_{B}=^{0}A_{1}\,^{1}A_{2}\,^{2}A_{A}\,^{A}A_{B} \quad (5)$$

Từ các phương trình (2) và (5), ta có phương trình động học robot dạng ma trận như sau:

$$^{0}A_{1}\,^{1}A_{2}\,^{2}A_{A}\,^{A}A_{B}=^{0}B_{B0}\,^{0}B_{1}\,^{1}B_{2}\,^{2}B_{B} \quad (6)$$

Hoặc đưa về dạng:

$$^{A}A_{B}=A_{AB}=\begin{bmatrix}c_{AB11}(q) & c_{AB12}(q) & c_{AB13}(q) & x_{AB}\\ c_{AB21}(q) & c_{AB22}(q) & c_{AB23}(q) & y_{AB}\\ c_{AB31}(q) & c_{AB32}(q) & c_{AB33}(q) & z_{AB}\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (7)$$

Với A_{AB} là ma trận tích hợp từ cấu trúc động học hai robot, các phần tử của A_{AB} là hàm của các tọa độ khớp $q_1,\ldots, q_6$. Ký hiệu:

$$\begin{cases}q=\left[q_1,q_2,\ldots,q_6\right]^T\\ \dot{q}=\left[\dot{q}_1,\dot{q}_2,\ldots,\dot{q}_6\right]^T\\ \ddot{q}=\left[\ddot{q}_1,\ddot{q}_2,\ldots,\ddot{q}_6\right]^T\end{cases} \quad (8)$$

Ta có:

$$^{A}A_{B}=^{2}A_{A}^{-1}(q_3)\,^{1}A_{2}^{-1}(q_2)\,^{0}A_{1}^{-1}(q_1)\,^{0}B_{B0}\,^{0}B_{1}(q_4)\,^{1}B_{2}(q_5)\,^{2}B_{B}(q_6) \quad (9)$$

Các phương trình (6) và (7) cho phép giải bài toán động học thuận và ngược robot.

Một cách tổng quát, đưa phương trình ma trận (6) hoặc (7) về hệ phương trình động học độc lập là hệ các phương trình đại số phi tuyến:

☞

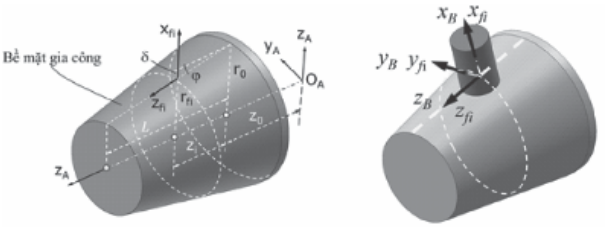
$$\begin{cases} f_1 = x_{AB}(q) - x = 0 \\ f_2 = y_{AB}(q) - y = 0 \\ f_3 = z_{AB}(q) - z = 0 \\ f_4 = c_{AB11}(q) - c_{11}(\alpha,\beta,\eta) = 0 \\ f_5 = c_{AB22}(q) - c_{22}(\alpha,\beta,\eta) = 0 \\ f_6 = c_{AB33}(q) - c_{33}(\alpha,\beta,\eta) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Trạng thái động học của robot bao gồm vị trí và hướng, vận tốc dài, vận tốc góc, gia tốc dài, gia tốc góc của dụng cụ đối với đối tượng gia công, có thể biểu diễn qua chuyển động của dụng cụ của khâu thao tác, tức biểu diễn hệ tọa độ $x_By_Bz_B$ đối với hệ tọa độ bàn kẹp $x_Ay_Az_A$. Điều này làm được khi giải bài toán động học thuận của robot. Từ các cảm biến có thể nhận được quy luật chuyển động của các khâu biểu diễn qua các tọa độ khớp và đạo hàm các cấp $q, \dot{q}, \ddot{q}$ của chúng theo thời gian. Khi đó, giải hệ (10), ta nhận được quy luật chuyển động của dụng cụ tức hệ tọa độ $x_By_Bz_B$ đối với hệ tọa độ bàn kẹp $x_Ay_Az_A$, xác định bởi $p, \dot{p}, \ddot{p}$.

Ngược lại, khi robot thực hiện thao tác công nghệ, tức chuyển động của dụng cụ đối với chi tiết gia công, các $p, \dot{p}, \ddot{p}$ xác định, giải hệ (10) cũng nhận được chuyển động của các khâu của robot.

4. ÁP DỤNG

Phần này trình bày việc áp dụng phương pháp mô hình hóa xây dựng mô hình khảo sát động học đã trình bày ở trên để tính toán, thiết kế quỹ đạo chuyển động của robot thực hiện thao tác công nghệ. Một ví dụ được thực hiện là robot mài bề mặt cong hình côn.



Hình 2. Robot tác hợp gia công cơ khí

Bảng 2. Các thông số cấu trúc chi tiết gia công và thông số công nghệ

z_0	r_0	L	φ	v_c	s_t	b
25mm	40mm	120mm	10°	25m/s	60mm/s	0.01mm

Các thông số cấu trúc chi tiết gia công và thông số công nghệ được dẫn ra trong Bảng 2. Trong đó, các thông số cấu trúc được chỉ ra tương ứng trên Hình 2.

Các thông số chế độ công nghệ gồm v_c là vận tốc cắt, b là chiều sâu cắt và lượng chạy dao vòng được quy ra lượng chạy dao theo thời gian là s_t.

Quá trình mài được thực hiện bởi mặt đầu của đá mài di chuyển dọc theo đường dụng cụ là đường sinh của bề mặt gia công sao cho bề mặt đầu của đá mài tiếp xúc với bề mặt hình côn của chi tiết gia công. Đặc trưng hình học của bề mặt gia công tại mỗi điểm trên đường dụng cụ có thể biểu diễn bởi một hệ tọa độ $x_{fi}y_{fi}z_{fi}$ sao cho trục x_{fi} tiếp tuyến với bề mặt gia công tại điểm f_i trên đường dụng cụ. Trục z_{fi} nằm dọc theo đường sinh, trục y_{fi} tạo thành hệ tọa độ thuận.

Điều kiện kỹ thuật gia công là hệ tọa độ dụng cụ $x_By_Bz_B$ và hệ tọa độ bề mặt gia công $x_{fi}y_{fi}z_{fi}$ trùng nhau, Hình 3:

$$x_By_Bz_B = x_{fi}y_{fi}z_{fi} \quad (11)$$

Từ các thông số đã cho, có thể tính quy

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

luật chuyển động trong không gian thao tác, tức là chuyển động của dụng cụ trong hệ tọa độ bàn kẹp $x_A y_A z_A$.

Do chi tiết gia công hình côn nên các tọa độ thao tác và đạo hàm các cấp của chúng trong (3) được tính theo các tọa độ trụ. Từ điều kiện gia công đã chỉ ra có thể biểu diễn các tọa độ thao tác trong hệ tọa độ bàn kẹp $x_A y_A z_A$:

$$p = \left[x_i, 0, z_i, 0, \varphi, 0\right]^T \quad (12)$$

Các chuyển động chạy dao theo thứ tự: tịnh tiến theo trục z_{fi} dọc đường sinh z_i, tịnh tiến theo trục x_{fi}dọc bán kính r_i, quay quanh trục y_{fi}góc φ:

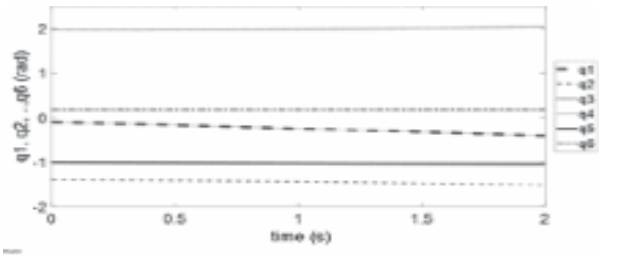
$$\begin{cases} T = \dfrac{L}{s_t} \\ z_i = s_t t \\ x_i = r_0 - z_i tg\varphi \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó T là thời gian gia công. Góc φ đã có trong Bảng 2. Chọn bước tính thời gian dt ta tính được số bước tính n, cũng như tính được vector $Z = [z_1,\ldots,z_n]$, $X = [x_1,\ldots,x_n]$. Như vậy, vị trí của dụng cụ trong hệ tọa độ bàn kẹp theo thời gian đã xác định. Gọi vZ, vX tướng ứng là các vector vận tốc, vZ, vX là các vector gia tốc của điểm thao tác của dụng cụ trong hệ tọa độ bàn kẹp:

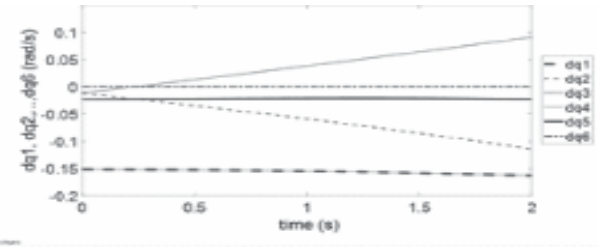
$$\begin{cases} vZ_i = s_t, \ \text{i=1,..,n;} \\ vX_i = -s_t tg\varphi, \ \text{i=1,..,n;} \end{cases} \quad \begin{cases} aZ_i = 0, \ \text{i=1,..,n;} \\ aX_i = 0, \ \text{i=1,..,n;} \end{cases} \quad (14)$$

Từ kết quả tính toán quy luật chuyển động trong không gian thao tác của dụng cụ, giải bài toán động học ngược bằng việc giải hệ phương trình đại số phi tuyến (10), ta nhận được quy luật chuyển động của các khâu của robot.

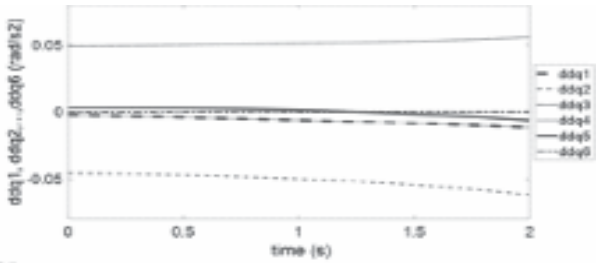
Hình 3 là các đồ thị biểu diễn các tọa độ khớp theo thời gian. Hình 4 là các đồ thị biểu diễn vận tốc tương đối của các khâu, tức đạo hàm bậc nhất của các tọa độ khớp theo thời gian. Hình 5 là các đồ thị biểu diễn gia tốc của các khâu theo thời gian.



Hình 3. Đồ thị vị trí các khâu theo thời gian t



Hình 4. Đồ thị vận tốc các khâu theo thời gian t



Hình 5. Đồ thị gia tốc các khâu theo thời gian t



Hình 6. Mô phỏng hoạt động robot tác hợp gia công mài tinh bề mặt chi tiết hình côn; https://youtu.be/__2aBpq3ciM [11]

5. KẾT LUẬN

Bài báo áp dụng phép biến đổi tọa độ để thiết lập mô hình tính toán cho phép biểu diễn chuyển động thao tác của dụng cụ đối với đối tượng thao tác động một cách thuận lợi. Mô hình tính toán tương tự như trường hợp dụng cụ thao tác trên đối tượng kẹp chặt trên giá cố định. Từ đó, việc tính toán quỹ đạo chuyển động là thuận lợi.

Sự phối hợp hai robot cho phép khả năng linh hoạt trong việc định vị và định hướng tương đối giữa dụng cụ và chi tiết gia công. Đây chính là lợi thế của robot tác hợp trong các thao tác công nghệ phức tạp như thao tác gia công tạo hình các bề mặt cong của các chi tiết máy.

Cùng số bậc tự do chuyển động tương đối giữa dụng cụ và đối tượng thao tác thì các robot thành phần của robot tác hợp sẽ có cấu trúc chuỗi động ngắn hơn. Điều này làm tăng độ cứng vững và tăng khả năng đảm bảo độ chính xác gia công.❖

Ngày nhận bài: **03/6/2025**
Ngày phản biện: **16/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Wang Wenbo, Guo Qiang, Yang Zhibo, Jiang Yan, Xu Jinting, "*A state-of-the-art review on robotic milling of complex parts with high efficiency and precision*". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 79 (2023) Article 102436, DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102436.

[2]. Wei Ji, Lihui Wang, "*Industrial robotic machining: a review*". Int. J. Adv. Manuf. Technol. 103 (2019) 1239-1255, DOI: 10.1007/s00170-019-03403-z.

[3]. John Pandremenos, Christos Doukas, Panagiotis Stavropoulos, Giorgos Chryssolouris, "*Machining with robots: A critical review*". In Proceedings of the DET 2011, Athens, Greece, 28-30 September 2011 1-8.

[4]. Wei Ji, Lihui Wang, "*Industrial robotic machining: a review*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103 (2019) 1239-1255, DOI: 10.1007/s00170-019-03403-z.

[5]. André F.V. Pedroso, Naiara P.V. Sebbe, Rita C.M. Sales-Contini, Francisco J.G. Silva, Rúben D.F.S. Costa, Iván I. Sánchez, Raul D.S.G. Campilho, "*An overview on the recent advances in robot-assisted compensation methods used in machining lightweight materials*". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 91 (2025) Article 102844, DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102844.

[6]. Javad Jahanpour, Mehdi Motallebi, Mojtaba Porghoveh, "*A Novel Trajectory Planning Scheme for Parallel Machining Robots Enhanced with NURBS Curves*". Journal of Intelligent & Robotic Systems 82 (2016) 257-275, DOI: 10.1007/s10846-015-0239-6

[7]. Michal Petko, Grzegorz Karpiel, Krzysztof Gac, Grzegorz Góra, Krzysztof Kobus, Janusz Ochoński, "*Trajectory tracking controller of the hybrid robot for milling*". Mechatronics 37 (2016) 100-111.

[8]. Souflas, Thanassis; Gerontas, Christos; Bikas, Harry; Stavropoulos, Panagiotis, "*On the Optimization of Robot Machining: A Simulation-Based*". Process Planning Approach Machines 12 (2024) Article 521, DOI: 10.3390/machines12080521.

[9]. Hà Thanh Hải, Đỗ Thị Kim Liên, Phan Bùi Khôi, "*Thiết kế quỹ đạo và mô phỏng hoạt động của robot tác hợp gia công tạo hình bề mặt cong phức tạp*". Hội nghị Cơ học Kỹ thuật toàn quốc kỷ niệm 40 năm thành lập Viện Cơ học, Hà Nội 09/4/2019, 211-219.

[10]. Phan Bùi Khôi, Hà Thanh Hải, Trần Minh Thúy (2020), "*Phân tích động học cho robot gia công phay*". Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI, Hà Nội, 02-03/12/2022, 648-656.

[11]. https://youtu.be/__2aBpq3ciM – *Mô phỏng hoạt động của robot.*

ỨNG DỤNG PHÂN TÍCH PHẦN TỬ HỮU HẠN ĐỂ TRỰC QUAN HÓA TRƯỜNG ỨNG SUẤT-BIẾN DẠNG NHẰM TÌM BIỆN PHÁP NÂNG CAO ĐỘ BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT MÁY

APPLICATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS TO VISUALIZE STRESS-STRAIN FIELDS TO FIND MEASURES TO IMPROVE FATIGUE STRENGTH OF MACHINE ELEMENTS

Nguyễn Văn Thạnh*, Nguyễn Hữu Lộc
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
**Email: ngvthanh@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Hiệu ứng Bauschinger khẳng định rằng khi vật liệu đã chịu biến dạng trước đó, nó sẽ dễ biến dạng lại theo chiều ngược và giới hạn chảy suy giảm dần theo số chu kỳ tải cho tới khi phá hủy. Cơ chế này gắn với quá trình biến dạng tuần hoàn: Ứng suất dư kích hoạt các đứt gãy chuyển động, thoát khỏi chướng ngại và quay về nguồn khi tải đảo dấu. Nghiên cứu trình bày giải pháp thiết kế hình học nhằm giảm σ_{max}, qua đó thu nhỏ vùng dẻo vượt ngoài miền đàn hồi Hooke – nơi tích lũy các vết nứt tế vi làm xuất hiện phá hủy mỏi. Phân tích phần tử hữu hạn bằng ANSYS được áp dụng để đánh giá ảnh hưởng của hai tham số R và d trong mối tương quan (R/d) đến trường ứng suất-biến dạng, từ đó đề xuất mô hình hình học có thể cải thiện độ bền mỏi của chi tiết máy.

Từ khóa: *Hiệu ứng Bauschinger; Tập trung ứng suất; Độ bền mỏi; FEA.*

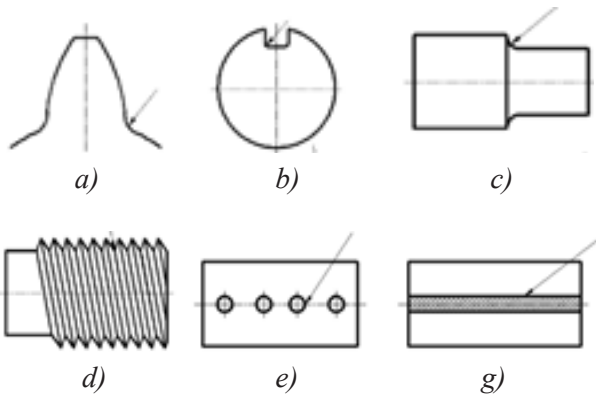
ABSTRACT

The Bauschinger effect states that when a material has been reviously eformed, it is more likely to deform again in the opposite direction and the yield strength will gradually decrease with the number of loading cycles until it fails. This mechanism is associated with the cyclic deformation process: residual stresses activate moving faults, which escape from the obstacle and return to the source when the load reverses. The study presents a geometric design solution to reduce σ_{max}, thereby reducing the plastic zone beyond the Hooke elastic zone - where microcracks accumulate and cause fatigue failure. Finite element analysis by ANSYS is applied to evaluate the influence of two parameters R and d in the correlation (R/d) on the stress-strain field, thereby proposing a geometric model that can improve the fatigue strength of the machine part.

Keywords: *Bauschinger effect; Stress concentration; Fatigue; FEA.*

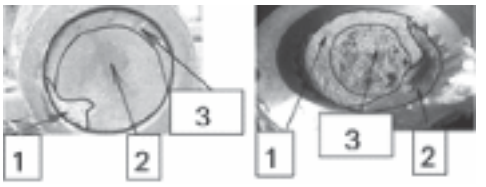
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vì nhiều lý do, không thể tránh việc tạo ra các vị trí có thể gây ra sự tập trung ứng suất trên tiết máy như Hình 1. Như vậy, tìm biện pháp làm giảm sự tập trung ứng suất là một hướng cần quan tâm.



Hình 1. Một số vị trí có tập trung ứng suất

Đặc trưng mặt cắt ngang bị phá hủy do mỏi có thể quan sát được như trong Hình 2, trong đó, vùng vết nứt mỏi lan truyền có bề mặt phẳng và nhẵn nhờ hóa bền gồm nhiều cung tròn đồng tâm đặc trưng cho giai đoạn phát triển của vết nứt, vùng phá hủy dẻo hay giòn có dạng sợi (hay tinh thể) biểu thị giai đoạn kết thúc mỏi.



a) Phá hủy dẻo. b) Phá hủy giòn.
1 - Hình thành; 2 - Lan truyền; 3 - Phá hủy
Hình 2. Vùng vết nứt mỏi lan truyền

Nhận thấy rằng, diện tích vùng hình thành vết nứt mỏi là nhỏ so với tiết diện của kết cấu làm việc và luôn phát triển từ biên giới mặt cắt của vật thể. Điều này chứng tỏ vết nứt mỏi ban đầu xuất phát tại vùng có ứng suất lớn nhất trong kết cấu, tương ứng với vùng có trường ứng suất và biến dạng lớn nhất trên tiết diện.

Theo [1], ứng suất cho phép của vật liệu bằng thép được xác định theo công thức:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_r}{K_\sigma}\frac{\varepsilon\beta K_L}{[S]} \quad (1)$$

Như vậy, nếu có thể tìm được những biện pháp thích hợp sao cho hệ số tập trung ứng suất K_σ càng giảm bằng cách giảm σ_{max} thì độ bền mỏi của kết cấu càng được nâng lên.

Ngoài ra, cơ năng của ngoại lực được lưu trữ lại trong vật liệu bị biến dạng dẻo khoảng từ (5-10%) [3] để tạo ra các dạng khuyết tật và sai hỏng khác nhau, dẫn đến những biến đổi về tổ chức tế vi và tính chất của nó. Biến dạng càng lớn thì những biến đổi trong tổ chức của vật liệu xảy ra càng nhiều.

Do đó, việc làm giảm biến dạng đồng nghĩa với việc giảm khả năng sinh ra khuyết tật gây hỏng do mỏi. Có thể giảm biến dạng bằng cách đã được trình bày trong nhiều tài liệu tính toán thiết kế máy như tăng độ cứng thể tích hoặc tiếp cận theo hướng ngược lại là tăng thể tích vùng cho phép biến dạng nhằm mục đích làm cho trường ứng suất rộng ra, và do đó làm giảm biến dạng đơn vị do giảm ứng suất trên một đơn vị thể tích.

Trong nội dung bài báo này, trình bày hướng tiếp cận như vậy theo cách hiệu chỉnh kết cấu sao cho độ mềm tăng lên - trường biến dạng tăng lên để biên độ biến dạng giảm xuống.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA NGHIÊN CỨU

Hệ số K_I trong các phương trình (2) và (3) là hệ số cường độ ứng suất ứng với vùng I - biểu diễn cho mối quan hệ kết hợp chặt chẽ

giữa tình trạng bề mặt và biên giới của các vết nứt, cũng như hình học mẫu và chế độ tải trọng. Như vậy, trong bài toán phẳng, nó không phụ thuộc vào các hằng số đàn hồi.

Để xác định biên giới của vùng biến dạng dẻo tại đỉnh của vết nứt trong vật thể rắn có thể chuyển sang xác định ứng suất tương đương nhận được khi xem xét khu vực đỉnh của vết nứt (theo Mises). Theo đó, ứng suất tương đương này vượt quá giá trị ứng suất σ_y (theo tính toán của Irwin) [2, 3].

Bán kính của vùng dẻo r_p tại đỉnh của vết nứt ($\theta = 0$) tỉ lệ với bình phương của hệ số cường độ ứng suất trong trạng thái phá huỷ I là:

- Với ứng suất phẳng:

$$r_p = \frac{1}{3\pi}\left(\frac{K_I}{\sigma_y}\right)^2 \quad (2)$$

- Với biến dạng phẳng:

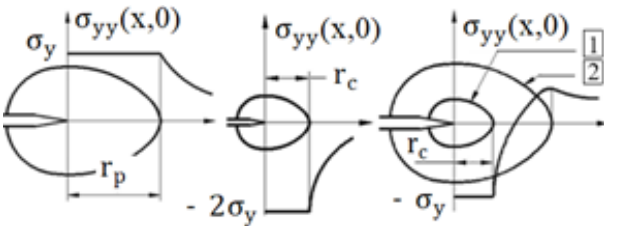
$$r_p = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_I}{\sigma_y}\right)^2 \quad (3)$$

Sự tồn tại một khu vực dẻo, phát sinh và phát triển rộng ra xung quanh đỉnh của vết nứt (theo hướng ngược lại) đã được nghiên cứu trong các công trình của Paris, McClintock, Rice. Các giá trị ứng suất trong vùng này cũng được tính toán, theo đó kết quả đã được Rice trình bày trong [4, 5].

Xem xét trạng thái chịu tải và ứng xử của vật liệu khi có tải, với bán kính lớn nhất của vùng dẻo r_p, được minh họa trong Hình 3a.

Với cùng mô hình thử nghiệm nhưng giảm tải đi một lượng là ΔF, sự tập trung ứng suất giảm xuống và do đó khu vực dẻo thu gọn vào bên trong [6].

Đối với chế độ tải thay đổi, các thông số trong phạm vi khu vực gần đỉnh vết nứt được tính toán theo như trong vùng tải tĩnh, ngoại trừ thông số tải σ_y tăng lên hai lần. Sự hiệu chỉnh này được thêm để đảm bảo sự chính xác của các kết quả xác định ứng suất trong khu vực dẻo được hình thành sau khi trừ đi các thay đổi biên độ ΔF, kết quả như minh họa trong Hình 3b.



a) b) c)

a) Vùng dẻo khi vật thể chịu tải P tĩnh; b) Vùng dẻo khi vật thể chịu tải tuần hoàn với biên độ ΔF ngược chiều với lực F; c) Kết quả tổng hợp; 1: Vùng dẻo tuần hoàn; 2: Vùng dẻo đều.

Hình 3. Sơ đồ mô tả quá trình hình thành khu vực dẻo dưới tác dụng của tải tuần hoàn

Nếu biên giới của các vết nứt không gặp các mặt nứt khác đột ngột, thì sự chồng chất của các ứng suất trong trường hợp tải tuần hoàn (Hình 3a) với trường hợp bỏ tải từng phần (Hình 3b) sẽ dẫn đến kết quả phân phối ứng suất tổng hợp như trong Hình 3c.

Ứng suất trong khu vực dẻo tuần hoàn tương đương với ứng suất nén (σ_y). Bán kính của vùng dẻo khi giảm tải một lượng ΔF là r_c, được tính theo phương trình (3), với lưu ý thay thế cường độ ứng lực K_I bằng biên độ cường độ ứng lực ΔK_I và σ_y bằng $-2\sigma_y$. Như vậy, kết quả thu được như sau:

$$r_c \approx \frac{1}{\pi}\left(\frac{\Delta K_I}{2\sigma_y}\right)^2 \quad (4)$$

Nếu tải trọng có chu kỳ mạch động, nhận được kết quả: $\Delta K_I = K_I$ và khi đó bán kính của vùng dẻo có giá trị như sau: $r_c = r_p/4$.

Trong trường hợp ứng suất phẳng và biến dạng phẳng, kích thước của vùng biến dạng dẻo tỉ lệ với hệ số tập trung ứng suất tại đỉnh của vết nứt. Tuỳ hình dạng ban đầu của vết nứt, nếu bán kính tại đỉnh vết nứt càng lớn thì hệ số tập trung ứng suất tại đó càng nhỏ và r_p càng nhỏ, nghĩa là vùng dẻo mở rộng trước khi bị phá hủy càng thu hẹp; nếu bán kính tại đỉnh vết nứt càng nhỏ thì hệ số tập trung ứng suất tại đó càng lớn và r_p càng lớn, nghĩa là vùng dẻo mở rộng trước khi bị phá hủy càng mở rộng [7].

Nếu chu kỳ tải trọng thay đổi tuần hoàn đã kết thúc, vẫn còn ứng suất dư tồn tại trong khu vực của đỉnh vết nứt. Sự tồn tại của ứng suất dư trong khu vực đỉnh vết nứt là để tạo ra sự cân bằng giữa ứng suất dư tại đỉnh của vết nứt và ứng suất dư tại các vùng khác xung quanh đỉnh vết nứt. Chính ứng suất này có thể gây ảnh hưởng của quá trình hình thành và phát triển vết nứt trong các chu kỳ ứng suất tiếp sau [8, 9].

Khi vết nứt không được đóng kín ứng suất dư tại khu vực đỉnh của vết nứt có thể quyết định quá trình phát triển vết nứt theo trạng thái phá hủy I (phá chẻ). Giá trị bán kính của vùng dẻo r_c, ứng suất thay đổi theo chu kỳ, biến dạng và chuyển vị chỉ phụ thuộc vào giá trị biên độ của tải trọng ΔF mà không phụ thuộc vào giá trị F. Lúc này, khu vực dẻo tuần hoàn tiếp tục mở rộng đến lúc $r_c = r_p$ (tại giới hạn này vật liệu bắt đầu bị phá hủy với với tốc độ cao hơn).

Nếu có một sự biến đổi tuần hoàn giá trị của hệ số cường độ ứng suất ΔK_I, từ $0 \div K_I$ đỉnh vết nứt sẽ được mở rộng thêm một đoạn $\Delta\delta_t$ - là một nửa trong tổng chiều dài mở rộng của vết nứt δ, ứng với hệ số cường độ tập trung ứng suất K_I. Như vậy, độ lớn của vết nứt mở rộng theo mô hình dẻo Dugdale, có thể viết thành:

$$\Delta\delta_t \approx \frac{\Delta K_I^2}{2\sigma_y E} \quad (5)$$

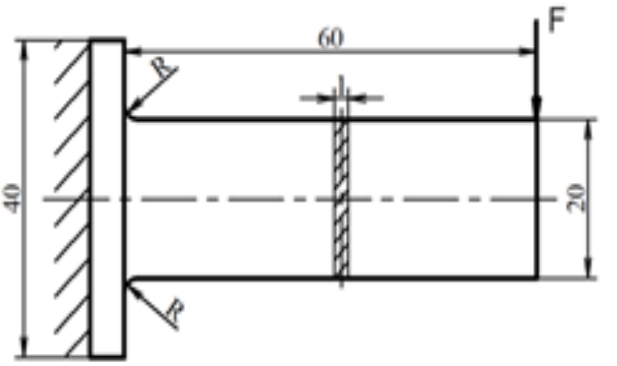
Phương trình (5) cho thấy rằng, có thể khảo sát bài toán với tải trọng mỏi thông qua khảo sát bài toán tải trọng tĩnh. Do đó, kết quả của bài toán tĩnh có thể dùng để hiệu chỉnh (về mặt kết cấu) cho bài toán mỏi.

3. PHƯƠNG PHÁP TRỰC QUAN HÓA VÙNG TẬP TRUNG ỨNG SUẤT

Sử dụng phần mềm ANSYS để khảo sát trường ứng suất và biến dạng phân bố trong mẫu. Tính hệ số tập trung ứng suất và đề xuất những thay đổi về mặt hình học nhưng vẫn đảm bảo chức năng làm việc của chi tiết.

- Vật liệu mẫu: E = 207000 MPa; υ = 0,3; σ_b = 400 MPa; F = 100 N.

- Hình học mẫu như Hình 4.



Hình 4. Hình học mẫu

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

4. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Kết quả phân tích ứng suất như Hình 5.

R, mm	σ_{max}, MPa
0	
0,8	
2	
3	
4	
5	

Hình 5. Kết quả mẫu phân tích ứng suất

Hệ số tập trung ứng suất lý thuyết như Bảng 1.

Bảng 1. Hệ số tập trung ứng suất lý thuyết

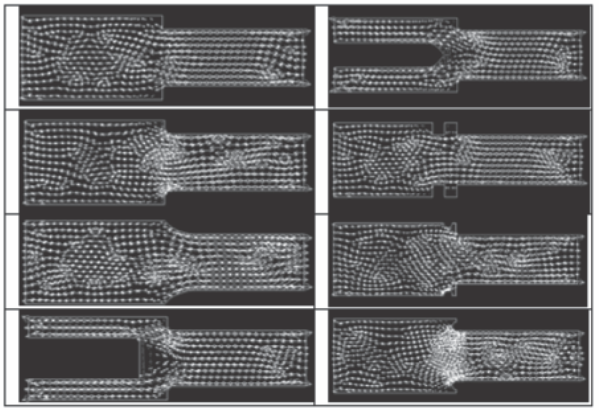
R, mm	σ_n, MPa	σ_{max}, MPa	$K_{\sigma t}$
0	90	236,941	2,63
0,8	90	223,931	2,59
2	90	162,966	1,81
3	90	142,120	1,58
4	90	140,242	1,56
5	90	130,863	1,45

Một số kết luận từ kết quả:

1) Việc tính toán xác định bán kính vùng dẻo theo lý thuyết phức tạp và trừu tượng. Trong khi đó, bằng việc dùng máy tính có ứng dụng phân tích ứng suất sẽ cho kết quả trực quan về vùng chịu ứng suất lớn, giúp nhanh chóng tìm được hệ số tập trung ứng suất, giúp dự đoán tuổi thọ của chi tiết máy.

2) Có thể quan sát trực quan và xác định được diện tích (thể tích) trường ứng suất nguy hiểm phân bố trên chi tiết, từ đó ước lượng được phạm vi vùng biến dạng đàn hồi, điều này cho ta căn cứ để xử lý kết cấu nhằm giảm hệ số tập trung ứng suất bằng cách làm tăng thể tích vùng biến dạng đàn hồi (tăng liên kết hình học của phần kết cấu có ứng suất lớn với các vùng lân cận có ứng suất nhỏ hơn như tăng bán kính góc lượn, thay thế cung tròn chuyển tiếp bằng các đường cong phù hợp, thêm gân, gờ chịu lực…), giảm sự chênh lệch độ cứng tiết diện tại vị trí có vùng phân bố ứng suất lớn (thay vì tăng tỉ lệ r/d có thể dùng biện pháp khác như vòng kẹp, chốt để định vị và chịu lực dọc…), hoặc dùng các pha vật liệu có độ cứng lớn làm thớ chịu lực bên ngoài giúp lan truyền vùng chịu lực ra thể tích lớn hơn thông qua các biện pháp nhiệt luyện hoặc biện pháp công nghệ như phun bi, lăn ép hoặc ghép kết cấu từ nhiều lớp. ☞

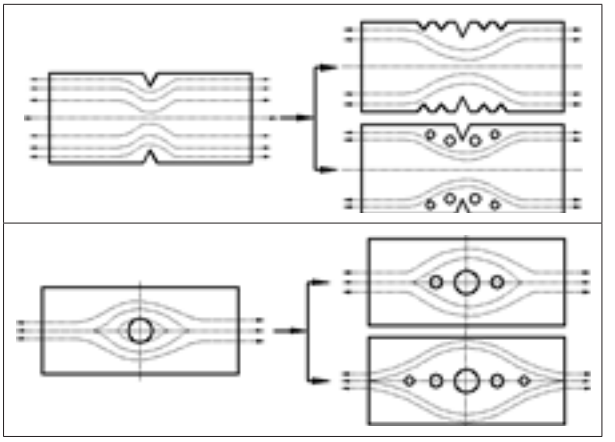
3) Có thể giải thích các kết cấu có khả năng cải thiện độ bền mỏi một cách trực quan thay vì thí nghiệm trên mô hình vật lý, từ đó có phương hướng điều chỉnh kết cấu chủ động nhằm cải thiện độ bền mỏi mà không nhất thiết phải trải qua quá trình thực nghiệm vốn tốn nhiều chi phí. Một số ví dụ trong việc hiệu chỉnh chủ động kết cấu như sau:

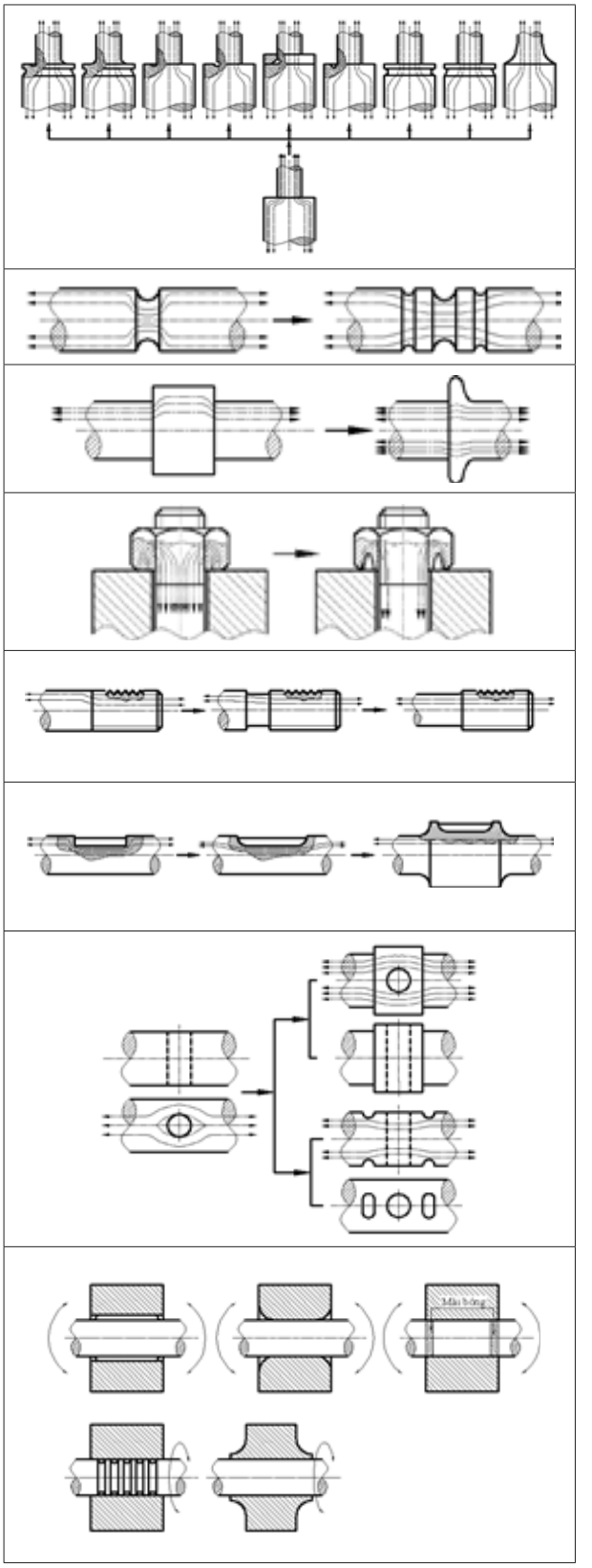


Hình 6. Mô hình điều chỉnh sự tập trung ứng suất khi kéo

Kết quả hiệu chỉnh mẫu theo dạng tải trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. Lược đồ trường ứng suất trước và sau hiệu chỉnh kết cấu





***Hướng phát triển:**

- Nghiên cứu khả năng chống mỏi của kết cấu có kết cấu nhiều lớp cùng loại vật liệu và khác loại vật liệu lắp chặt với nhau hoặc mối ghép dán.

- Nghiên cứu khả năng kéo dài tuổi thọ trên cơ sở thiết kế kết cấu gồm nhiều lớp vật liệu lắp chặt sẽ ngắt việc phát triển vết nứt do năng lượng cơ học tích lũy trong vùng dẻo gây ra vết nứt tế vi ban đầu sẽ trở về không trên bề mặt vết nứt.❖

Ngày nhận bài: **02/6/2025**
Ngày phản biện: **16/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Hữu Lộc (2020), "*Giáo trình Cơ sở thiết kế máy*". NXB. Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh.
[2]. Suresh, S. (1998), "*Fatigue of Materials*" (2nd ed.). Cambridge University Press.
[3]. Collins, J. A. (1993), "*Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention*" (2nd ed.). John Wiley & Sons.
[4]. Peterson, R. E. (1974), "*Stress Concentration Factors*". John Wiley & Sons.
[5]. Weibull, W. (1961), "*Fatigue Testing and Analysis of Results*". Pergamon Press, Oxford.
[6]. Nguyen, H.-G., Young, S.-J., Le, T.-D., Vu, T.-N., & Fang, T.-H. (2025), "*Bauschinger effect on high entropy alloy under cyclic deformation*". Intermetallics, 183, 108830.
[7]. Kassner, M. E., Geantil, P., Levine, L. E., & Larson, B. C. (2008), "*Backstress, the Bauschinger Effect and Cyclic Deformation*". Materials Science Forum, 604-605, 39-51.
[8]. Pommeir, S., & Bompard, P. H. (2000), "*Bauschinger effect of alloys and plasticity-induced crack closure: a finite element analysis*". Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 23(2), 129-139.
[9]. Prajwal, S., Dhinakaran, V., & Jagadeesha, T. (2020), "*Size optimization of shoulder-filleted shafts with relief grooves for improving their fatigue life*". AIP Conference Proceedings, 2283(1), 020057.

NGHIÊN CỨU CÁC NHÂN TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ĐỘ BỀN TIẾP XÚC BÁNH RĂNG NHỰA SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI

RESEARCH ON THE FACTORS AFFECTING THE CONTACT STRENGTH OF PLASTIC GEARS USING THE TAGUCHI METHOD

Võ Thanh Hòa*, Nguyễn Phan Thanh Hào, Nguyễn Hữu Lộc
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
**Email: hoa.vo0502@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Bánh răng nhựa ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền động nhờ ưu điểm nhẹ, ít ồn và chống ăn mòn. Tuy nhiên, độ bền tiếp xúc vẫn là thách thức lớn, nhất là trong điều kiện tải trọng cao hoặc tốc độ lớn. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp Taguchi để xác định và đánh giá mức độ ảnh hưởng ảnh hưởng các thông số hình học và vận hành đến độ bền tiếp xúc bánh răng nhựa. Các đại lượng khảo sát gồm mô-đun, số răng, chiều rộng mặt răng, tải trọng, tỉ số truyền, góc ăn khớp,... Ma trận trực giao L27 được dùng để thiết lập các tổ hợp thí nghiệm, và độ bền tiếp xúc được xác định qua mô phỏng. Phân tích ANOM cho thấy mức độ ảnh hưởng từng nhân tố. Phân tích tỷ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) giúp xác định tổ hợp tham số tối ưu nhằm nâng cao độ bền tiếp xúc. Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho thiết kế hiệu quả các hệ truyền động bánh răng nhựa chịu tải cao.

Từ khóa: *Bánh răng trụ; Vật liệu nhựa; Taguchi; Độ bền tiếp xúc; Tiêu chuẩn VDI.*

ABSTRACT

Plastic gears are increasingly used in power transmission systems due to their advantages of light weight, low noise, and corrosion resistance. However, contact strength remains a major challenge, especially under high-load or high-speed conditions. This study uses the Taguchi method to identify and evaluate the influence of geometric and operational parameters on the contact strength of plastic gears. The variables investigated include module, number of teeth, face width, transmission ratio, pressure angle, and so on. An L27 orthogonal array is employed to establish the experimental combinations, and contact strength is determined through simulation. Analysis of Means (ANOM) reveals the level of influence of each factor. Signal-to-noise (S/N) ratio analysis is then used to determine the optimal parameter set for enhancing contact strength. The results of this research provide a foundation for the efficient design of high-load plastic gear transmissions.

Keywords: *Plastic gears; Plastic material; Taguchi; Contact strength; VDI standard.*

1. GIỚI THIỆU

Bánh răng nhựa ngày càng đóng vai trò quan trọng trong các hệ thống truyền động hiện đại nhờ ưu điểm như trọng lượng nhẹ, độ đàn hồi cao, chịu va đập tốt và khả năng làm việc không cần bôi trơn [1, 2]. Nhờ tiến bộ trong công nghệ, bánh răng nhựa đã trở thành giải pháp thay thế hiệu quả cho bánh răng kim loại trong nhiều lĩnh vực như ô tô, tự động hóa và công nghiệp hóa chất. Dù vẫn còn hạn chế về độ bền cơ học và khả năng chịu tải, nhưng nhờ cải tiến về vật liệu, bánh răng nhựa ngày càng bền hơn, đáng tin cậy hơn, giúp giảm chi phí và nâng cao hiệu suất trong môi trường khắc nghiệt.

Độ bền tiếp xúc là một trong những cơ chế hư hỏng phổ biến trong các hệ thống truyền động bánh răng nhựa, với các dạng điển hình như tróc rỗ, bong tróc và gãy hoặc lõm mặt răng. Tróc rỗ là hiện tượng xuất hiện các vết rỗ nhỏ trên bề mặt tiếp xúc, trong khi bong tróc là sự bong tróc lớp vật liệu do ứng suất quá lớn. Gãy hoặc biến dạng răng xảy ra khi ứng suất vượt quá giới hạn chịu đựng của vật liệu [3]. Những hư hỏng này làm giảm hiệu suất, độ tin cậy và tuổi thọ của hệ thống. Nguyên nhân chủ yếu là do ứng suất tiếp xúc vượt mức cho phép, vì vậy việc tính toán và đánh giá độ bền tiếp xúc đóng vai trò quan trọng trong thiết kế bánh răng nhựa.

Để tối thiểu thí nghiệm và giảm thiểu ảnh hưởng bởi những nhân tố gây ra sự sai lệch từ đó nhanh chóng điều chỉnh các thông số tiến đến tối ưu nhanh nhất, phương pháp Taguchi được lựa chọn như một giải pháp hiệu quả, giúp xác định các giá trị tối ưu [4]. Phương pháp Taguchi có một phạm vi ứng dụng rộng rãi, từ vi sinh vật học đến nông nghiệp, từ dược phẩm đến kỹ thuật. Phương pháp Taguchi có phạm vi ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau, và gần đây được áp dụng trong lĩnh vực thiết kế cơ khí [5].

Mục tiêu của nghiên cứu này là tập trung phân tích yếu tố ảnh hưởng và tìm ra tổ hợp thông số tối ưu nhằm nâng cao độ bền tiếp xúc của bánh răng nhựa. Bằng cách sử dụng phương pháp Taguchi để đánh giá xác định mức độ ảnh hưởng của các thông số đến ứng suất tiếp xúc, xây dựng phương trình hồi quy để xác định tổ hợp thông số tối ưu.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Độ bền tiếp xúc của bánh răng nhựa

Theo tiêu chuẩn VDI-2736, ứng suất tiếp xúc lớn nhất bánh răng nhựa thân khai được tính toán theo công thức Hertz, với giả sử dạng tiếp xúc giữa hai bề mặt thân khai của răng là tiếp xúc của hai trụ tròn có đường kính là $d_1 = d_{b1} \sin\alpha_n$. Công thức tính như sau [6]:

$$\sigma_H = Z_M . Z_H . Z_\varepsilon . Z_\beta . \sqrt{\frac{F_{t1} . K_H . (u+1)}{b . d_1 . u}} \quad (1)$$

Với Z_M là hệ số xét đến cơ tính vật liệu; Z_H là hệ số xét đến hình dạng của bề mặt tiếp xúc; Z_ε là hệ số xét đến tổng chiều dài tiếp xúc; Z_β là hệ số xét đến ảnh hưởng của góc nghiêng răng ($Z_\beta = 1$ đối với bánh răng trụ răng thẳng); K_H là hệ số tải trọng tính, trong nghiên cứu này chọn $K_H = 1$ (Theo tính chất đàn hồi của nhựa nhiệt dẻo $K_H \approx K_A$ áp dụng như một cách đơn giản hóa cho tất cả các mô-đun khi $b/mn \leq 12$ và $K_A = 1$).

Tiêu chuẩn VDI-2736 chỉ đưa bảng tra của tiêu chuẩn DIN 3990 [6] về các hệ số Z_H và Z_ε theo góc áp lực $a = a_n = 20°$. Điều này sẽ gây ra trở ngại khi người kỹ sư muốn tính toán với ☞

góc áp lực khác giá trị được tham khảo trong VDI.

Các hệ số Z_M, Z_H và Z_ε theo tiêu chuẩn ISO 6336-2:2006 [7]:

Hệ số vật liệu Z_M phụ thuộc vào mô-đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν:

$$Z_M = \sqrt{\frac{1}{\pi.\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)}} \quad (2)$$

Hệ số dạng bề mặt tiếp xúc Z_H phụ thuộc vào góc áp lực α:

$$Z_H = \sqrt{\frac{2}{\sin\alpha.\cos\alpha}} \quad (3)$$

Hệ số tiếp xúc Z_ε được tính toán theo công thức sau:

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4-\varepsilon_\alpha}{3}.(1-\varepsilon_\beta)+\frac{\varepsilon_\beta}{\varepsilon_\alpha}};\ \varepsilon_\beta < 1 \quad (4)$$

Với hệ số trùng khớp dọc $\varepsilon_\beta = 0$, vì bánh răng được nghiên cứu là bánh răng trụ răng thẳng;

Hệ số trùng khớp ngang ε_α được xác định theo công thức [7]: $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$

$$= \frac{1}{2.\pi}.\left(z_1\left(\sqrt{\left(\frac{m_n.z_1+2m_n}{m_n.z_1.\cos\alpha}\right)^2}-1-\tan\alpha\right)+z_2.\left(\sqrt{\left(\frac{m_n.z_2+2m_n}{m_n.z_2.\cos\alpha}\right)^2}-1-\tan\alpha\right)\right) \quad (5)$$

Tuy nhiên, VDI-2736 chỉ xem xét đến các thông số hình học và vật liệu bánh răng mà bỏ qua sự ảnh hưởng của nhiệt độ T° khi tính toán thiết kế cho bánh răng nhựa, đều này có thể hiểu là do VDI và các tiêu chuẩn tính toán bánh răng nhựa hiện tại được dựa trên các tiêu chuẩn đã được thực hiện trên bánh răng kim loại. Việc chuyển đổi từ kim loại sang vật liệu nhựa nhiệt dẻo cho các ứng dụng bánh răng không hề đơn giản. Nhiệt độ làm thay đổi đáng kể mô-đun đàn hồi, độ bền kéo, hoặc tỷ lệ hấp thụ nước. Việc một chi tiết polyme bị ướt, ẩm, hoặc khô cũng có ảnh hưởng đến mô-đun chảy dẻo và giới hạn chảy. Với những đặc tính mới này, không chỉ dừng lại ở việc nhựa có độ bền cơ học thấp hơn, người thiết kế bánh răng cần phải lưu ý đến các khía cạnh này. Theo nghiên cứu của S. Felder [8], mô-đun đàn hồi E của nhựa PA66 có quan hệ chặt chẽ với nhiệt làm việc T° của vật liệu nhựa.

Quan hệ giữa nhiệt độ làm việc T° tại bề mặt răng với các thông số hình học và điều kiện vận hành được xác định qua công thức [7]:

$$T^o = \vartheta_{Fl\alpha_{1,2}} = \vartheta_0 + P.\mu.H_V.\left(\frac{k_{\vartheta,Fl\alpha}}{b.z_{1,2}.(v_t.m_n)^{0,75}}+\frac{R_{\lambda,G}}{A_G}\right).ED^{0,64} \quad (6)$$

Với: ϑ_0 là nhiệt độ môi trường xung quanh (°C); P là công suất danh nghĩa (W); μ là hệ số ma sát; HV là hệ số mất mát công suất trên răng; $k_{\vartheta,Fl\alpha}$ là hệ số truyền nhiệt của bánh răng nhựa để tính nhiệt độ thân răng (K.(m/s)0,75. mm1,75/W); b là chiều rộng bánh răng (mm); z là số răng bánh răng; m_n là mô-đun pháp tuyến (mm); v_t là vận tốc tiếp tuyến (m/s); R_λ,G là hệ số độ trở truyền nhiệt của vỏ hộp (K.m²/W); AG là diện tích bề mặt tỏa nhiệt của vỏ hộp (m²) (không áp dụng cho trường hợp cơ cấu không có vỏ hộp); ED là thời gian ăn khớp (tiếp xúc) răng tương đối (phút).

Theo nghiên cứu của S. Felder [8], mô-đun đàn hồi E có quan hệ chặt chẽ với nhiệt làm việc T° của vật liệu nhựa PA66, được thể hiện bởi phương trình hàm mũ sau:

$$E = 3334\exp(-0{,}0172T^o);\ 20°C \le T^o \le 160°C \quad (7)$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Đối với vật liệu PA66, có tính chất đẳng hướng và đồng nhất thì ta có thể xấp xỉ giá trị hệ số Poisson theo mô-đun khối K và mô-đun đàn hồi E bởi phương trình sau [9]:

$$\nu = \frac{3K - E}{6K} \quad (8)$$

2.2. Phương pháp Taguchi

Thiết kế thực nghiệm Taguchi có thể giúp thiết kế một quá trình thực nghiệm mà ít chịu ảnh hưởng bởi những nhân tố gây ra sự sai lệch về chất lượng. Mục đích là điều chỉnh các thông số đến mức tối ưu để quá trình ổn định ở mức chất lượng tốt nhất. Phương pháp Taguchi sử dụng ma trận trực giao trong quy hoạch thực nghiệm. Do đó, phương pháp này cho phép sử dụng tối thiểu các thí nghiệm cần thiết để nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố lên một đáp ứng được lựa chọn nào đó trong các bài toán kỹ thuật có nhiều yếu tố, từ đó nhanh chóng điều chỉnh các thông số tiến đến tối ưu nhanh nhất.

Trong nghiên cứu này, giá trị ứng suất tiếp xúc cần được càng nhỏ càng tốt để nâng cao độ bền tiếp xúc của bộ truyền. Do đó tỷ số tín hiệu/nhiễu (Signal to Noise Ratio) S/N sẽ được sử dụng với tiêu chí "Nhỏ hơn thì tốt hơn – Lower is better" [4]:

$$\frac{S}{N} = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N} y_i^2\right) \quad (9)$$

3. QUY HOẠCH THỰC NGHIỆM

3.1. Lựa chọn các nhân tố và mức giá trị

Phương pháp bề mặt đáp ứng được sử dụng khi cần mô tả chính xác mối quan hệ giữa hàm mục tiêu và các nhân tố thí nghiệm. Mục tiêu của phương pháp này là tăng số lượng điểm thí nghiệm để xây dựng một mô hình bậc hai mô tả hàm mục tiêu. Theo kinh nghiệm thực tiễn, mô hình hàm bậc hai thường đủ chính xác để mô tả đặc điểm của hàm mục tiêu trong các bài toán tối ưu có phạm vi giá trị các nhân tố nằm trong giới hạn đặt ra.

Tổng hợp các nhân tố ảnh hưởng đến độ bền tiếp xúc bao gồm: số răng z_1, tỉ số truyền u, góc ăn khớp α, mô-đun răng m, chiều rộng vành răng b, mô-đun đàn hồi E, hệ số Poisson ν, nhiệt độ làm việc T°. Tuy nhiên, theo S. Felder [8] và Mael Péron [9] thì mô-đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν của vật liệu nhựa (cụ thể là PA66) phụ thuộc vào nhiệt độ làm việc T° nên ta loại nhân tố mô-đun E và hệ số Poisson ν đồng thời giữ lại nhân tố nhiệt độ T° trong quy hoạch này. Các giá trị của các nhân tố nghiên cứu ảnh hưởng được xác định với ba mức (Bảng 1).

Bảng 1. Mã hóa và các mức giá trị nhân tố

STT	Nhân tố	Ký hiệu		Mức giá trị			Khoảng thay đổi
		Tự nhiên	Mã hóa	1	2	3	
1	Mô-đun răng, mm	m	x_1	2	5	8	3
2	Góc biên dạng, độ	α	x_2	20	25	30	5
3	Nhiệt độ, °C	T°	x_3	30	40	50	10
4	Số răng	z_1	x_4	20	25	30	5
5	Tỉ số truyền	u	x_5	1	1,4	1,8	0,4
6	Chiều rộng vành răng, mm	b	x_6	20	30	40	10

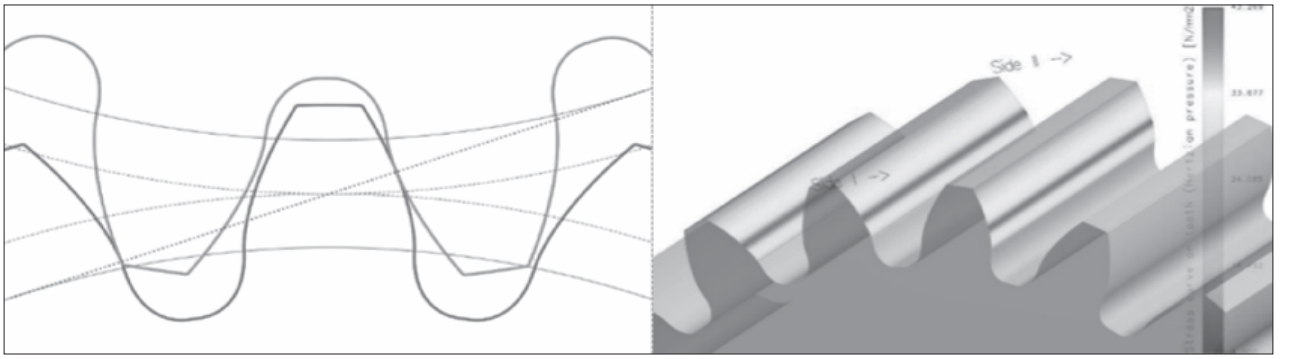
Các nhân tố cố định bao gồm: x = 0, T = 8 Nm.

3.2. Ma trận quy hoạch Taguchi

Chọn dạng ma trận quy hoạch tương ứng với số nhân tố và số mức giá trị, ở đây ta sử dụng 6 nhân tố với 3 mức giá trị nên sử dụng ma trận tương ứng là L27, thể hiện ở Bảng 2. Các kết quả thu được từ phần mềm KissSoft 2024.

Bảng 2. Ma trận quy hoạch và kết quả

N	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	σ_H (MPa)
1	1	1	1	1	1	1	43,2694
2	1	1	1	1	2	2	33,3363
3	1	1	1	1	3	3	27,3448
4	1	2	2	2	1	1	30,6365
5	1	2	2	2	2	2	23,0500
6	1	2	2	2	3	3	18,9581
7	1	3	3	3	1	1	22,5564
8	1	3	3	3	2	2	17,0052
9	1	3	3	3	3	3	14,0055
10	2	1	2	3	1	2	8,7260
11	2	1	2	3	2	3	6,9444
12	2	1	2	3	3	1	9,3098
13	2	2	3	1	1	2	11,6220
14	2	2	3	1	2	3	9,2701
15	2	2	3	1	3	1	12,4461
16	2	3	1	2	1	2	10,4548
17	2	3	1	2	2	3	8,3573
18	2	3	1	2	3	1	11,2377
19	3	1	3	2	1	3	5,2758
20	3	1	3	2	2	1	6,8533
21	3	1	3	2	3	2	5,3023
22	3	2	1	3	1	3	4,8819
23	3	2	1	3	2	1	6,3643
24	3	2	1	3	3	2	4,9366
25	3	3	2	1	1	3	6,5349
26	3	3	2	1	2	1	8,5272
27	3	3	2	1	3	2	6,6181



Hình 1. a) Biểu diễn biên dạng răng và b) Kết quả phân tích tiếp xúc răng của bộ thông số thí nghiệm thứ nhất bằng phần mềm KissSoft

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các nhân tố tác động đến kết quả theo hai hướng. Tác động làm kết quả tiến đến gần mục tiêu là tín hiệu có ích, gọi là "tín" (Signal). Tác động làm kết quả rời xa mục tiêu là "nhiễu" (Noise). Tỷ số S/N đại diện cho chỉ tiêu hiệu quả, được dùng để đánh giá và lựa chọn các nhân tố ảnh hưởng. Bộ thông số tốt là khi cho tỷ số S/N lớn và bộ thông số tối ưu nhất là cho S/N lớn nhất. Kết quả tỷ số S/N của từng nhân tố với bài toán cực tiểu được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả Signal to Noise Ratios "Lower is better"

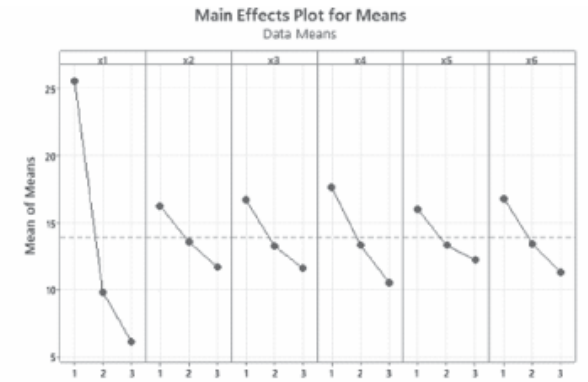
Level	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	-27,67	-21,4	-21,72	-22,87	-21,62	-22,58
2	-19,71	-20,98	-20,99	-20,89	-20,93	-20,84
3	-15,63	-20,64	-20,31	-19,26	-20,48	-19,6
Delta	12,04	0,76	1,41	3,61	1,14	2,98
Rank	1	6	4	2	5	3

Để xác định mức ảnh hưởng của các nhân tố đến kết quả đầu ra là ứng suất tiếp xúc, ta cần phân tích các chỉ số của Analysis of Mean – ANOM như Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả phân tích Means

Level	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	25,574	16,262	16,687	17,663	15,995	16,8
2	9,819	13,574	13,256	13,347	13,301	13,45
3	6,144	11,7	11,593	10,526	12,24	11,286
Delta	19,43	4,563	5,094	7,138	3,755	5,514
%	42,72%	10,03%	11,19%	15,68%	8,26%	12,12%
Rank	1	5	4	2	6	3

Theo như kết quả phân tích thì ảnh hưởng của các thông số như sau: mô đun răng m – x_1 (42,72%), số răng z_1 – x_4 (15,68%), chiều rộng vành răng b – x_6 (12,12%) và nhiệt độ T° – x_3 (11,19%) lần lượt là 4 nhân tố ảnh hưởng nhiều nhất đến ứng suất tiếp xúc của bánh răng. Các nhân tố đều có xu hướng làm giảm giá trị ứng suất tiếp xúc của bánh răng nhựa trong miền quan sát như Hình 2.



Hình 2. Biểu đồ thể hiện ảnh hưởng chính của từng nhân tố đến giá trị trung bình đầu ra trong thí nghiệm Taguchi

Từ việc phân tích Hình 2, ta rút ra được bộ thông số tối ưu cho giá trị trung bình – Means là thấp nhất là (x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6) = (3; 3; 3; 3; 3; 3), tương ứng bộ thông số của giá trị tự nhiên là (m; α; T°; z_1; u; b) = (8; 30; 5; 30; 1,8; 40) cho ứng suất tiếp xúc của bộ truyền nhỏ nhất với 2,8362 MPa. Ở đây ta nhận xét rằng nhiệt độ T° tăng thì ứng suất tiếp xúc giảm, tuy nhiên theo nhóm tác giả Zehua Lu [10] tuổi thọ tại bề mặt răng sẽ giảm theo nhiệt độ T°, điều này đặt ra phải nghiên cứu sâu hơn về đặc tính cơ-nhiệt của vật liệu nhựa trong bộ truyền bánh răng.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã tập trung vào việc xác định và tối ưu hóa các yếu tố hình học ảnh hưởng đến độ bền tiếp xúc của bánh răng nhựa, sử dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi kết hợp với ma trận trực giao L27. Phân tích tỷ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) và phân tích Means (ANOM) đã được áp dụng để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố và xác định tổ hợp thông số tối ưu.

Kết quả nghiên cứu đã xác định được tổ hợp thông số tối ưu nhằm giảm thiểu ứng suất tiếp xúc, một chỉ tiêu quan trọng đánh giá độ bền, bao gồm: mô-đun răng (m) là 8 mm, góc ăn khớp (α) là 30°, nhiệt độ làm việc (T°) là 50°C, số răng (z_1) là 30, tỉ số truyền (u) là 1,8, và chiều rộng vành răng (b) là 40 mm. Với tổ hợp này, ứng suất tiếp xúc dự đoán đạt giá trị thấp nhất là 2,8362 MPa thấy sự cải thiện đáng kể về khả năng chịu tải của bánh răng.

Phân tích Means (ANOM) đã làm nổi bật các yếu tố có ảnh hưởng chủ đạo: mô-đun răng (m) đóng góp 42,72% vào sự thay đổi của ứng suất tiếp xúc, tiếp theo là số răng (z_1) với 15,68%, chiều rộng vành răng (b) với 12,12%, và nhiệt độ (T°) với 11,19%. Các yếu tố còn lại như góc ăn khớp, tỉ số truyền cho thấy ảnh hưởng ít hơn trong phạm vi các mức giá trị được khảo sát. Việc lựa chọn tổ hợp thông số tối ưu này không chỉ giúp giảm thiểu ứng suất cục bộ, một trong những nguyên nhân chính gây ra các dạng hư hỏng bề mặt như tróc rỗ và bong tróc, mà còn hứa hẹn kéo dài tuổi thọ và nâng cao độ tin cậy của hệ thống truyền động bánh răng nhựa, đặc biệt trong các ứng dụng đòi hỏi độ bền cao.

Để phát triển sâu hơn và toàn diện hơn, các nghiên cứu trong tương lai nên tập trung vào việc đánh giá đồng thời nhiều chỉ tiêu như độ bền uốn, độ bền tiếp xúc, độ cứng, độ bền mòn, nhiệt độ… tích hợp phương pháp này với các công cụ khác như Grey Taguchi, sử dụng mô phỏng với Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để xây dựng mô hình tối ưu đa mục tiêu. Kết

hợp mô phỏng bằng phân tích phần tử hữu hạn (FEM) để đi sâu vào phân tích ứng suất biến dạng chi tiết. Bên cạnh đó, việc tiến hành các thí nghiệm độ bền, độ cứng, độ bền mòn,… là vô cùng cần thiết để kiểm chứng kết quả lý thuyết và mô phỏng, đồng thời đánh giá tuổi thọ thực của bánh răng dưới các điều kiện vận hành cụ thể, từ đó đưa ra những giải pháp thiết kế và lựa chọn vật liệu tối ưu hơn.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ đề tài mã số SVKSTN-2024-CK-32. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **02/6/2025**
Ngày phản biện: **16/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Davis, J.R. (2005), "*Gear Materials, Properties, and Manufacture*". ASM International, 2005.

[2]. Tạ Trí Thông, Nguyễn Hữu Lộc (2023), *"Nghiên cứu tính toán thiết kế bánh răng bằng vật liệu nhựa*". Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI, 2023, Hà Nội (Việt Nam).

[3]. VDI 2736-Part 1 (2016), "*Thermoplastic Gear Wheels - Materials, Material Selection, Production Methods, Production Tolerances, form Design*".

[4]. Nguyễn Hữu Lộc (2021), "*Giáo trình Quy hoạch và phân tích thực nghiệm*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.

[5]. Nguyễn Hữu Lộc, Lê Thanh Duy (2021), "*Nghiên cứu ảnh hưởng các thông số đến hiệu suất bộ truyền bánh răng sử dụng phương pháp Taguchi*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số đặc biệt, tháng 11, 10, 2021.

[6]. VDI 2736-Part 2 (2014), "*Thermoplastic Gear Wheels - Cylindrical Gears - Calculation of the Load-Carrying Capacity*".

[7]. ISO (2006), "*ISO 6336-2, Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 2: Calculation of surface durability (pitting)*".

[8]. S. Felder, N.A. Vu, S. Reese, J.-W. Simon (2020), "*Modeling the effect of temperature and degree of crystallinity on the mechanical response of Polyamide 6*". Mechanics of Materials, Volume 148, September 2020.

[9]. Péron, Mael & Jacquemin, Frédéric & CASARI, Pascal & Orange, Gilles & Jean-Luc, Bailleul & Boyard, Nicolas (2019), "*Thermomechanical characterization of a low viscosity PA66 thermoplastic matrix and associated continuous glass fibre composite under processing conditions*". Journal of Composite Materials, 53. 3169-3186, 10.1177/0021998319862344.

[10]. Lu, Zehua & Liu, Huaiju & Zhang, Renhua & Caichao, Zhu & Shen, Yaqiang & Dong, Xin. (2021), "*The simulation and experiment research on contact fatigue performance of acetal gears*". Mechanics of Materials, 154. 103719, 10.1016/j.mechmat.2020.103719.

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG MPC-LTI CHO ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN LÀN XE TỰ HÀNH

RESEARCH ON APPLYING MPC-LTI FOR LANE-CHANGING CONTROL OF AUTONOMOUS VEHICLES

Trần Văn Lợi[1,*], Nguyễn Hùng Mạnh[2], Trần Xuân Nhã[1]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải
[2]Trường Đại học Điện lực (EPU)
*Email: *tvloi_ph@utc.edu.vn;*
manhnh@epu.edu.vn;
6251040090@st.utc2.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu xe tự hành, việc điều khiển chuyển làn là một bài toán quan trọng đòi hỏi khả năng bám quỹ đạo tham chiếu với độ chính xác và ổn định cao. Bài báo trình bày phương pháp điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) áp dụng cho hệ thống tuyến tính bất biến theo thời gian (Linear Time-Invariant - LTI), cụ thể trong trường hợp vận tốc của xe được coi không đổi. Mục tiêu chính của nghiên cứu là khảo sát và hiệu chỉnh các hệ số trọng số trong hàm chi phí toàn phương (quadratic cost function), nhằm xác định bộ tham số tối ưu cho việc bám quỹ đạo hiệu quả. Hiệu suất của bộ điều khiển được đánh giá thông qua các mô phỏng trên nhiều dạng quỹ đạo khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy việc tối ưu hóa các tham số không chỉ cải thiện độ chính xác bám quỹ đạo mà còn tăng cường độ mượt và độ ổn định của xe, đồng thời thỏa mãn các ràng buộc vật lý và hệ thống. Phương pháp này cho thấy tiềm năng ứng dụng điều khiển cho các hệ thống xe tự hành.

Từ khóa: *Ô tô tự lái (Autonomous Vehicles); Điều khiển tối ưu (Optimal Control); Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control); Hệ thống bất biến theo thời gian (LTIs-Linear Time Invariant System).*

ABSTRACT

In autonomous vehicle research, lane-changing control is a key challenge requiring precise and stable trajectory following. This paper introduces a Model Predictive Control (MPC) approach applied to a Linear Time-Invariant (LTI) system, assuming constant vehicle speed. The study focuses on tuning the weighting coefficients in the quadratic cost function to optimize parameters for effective trajectory tracking. Controller performance is assessed through simulations across various trajectories. Results demonstrate that parameter optimization enhances tracking accuracy, vehicle smoothness, and stability while meeting physical and system constraints. The method shows promise for autonomous vehicle control applications.

Keywords: *Autonomous Vehicles; Optimal Control; Model Predictive Control; LTIs-Linear Time Invariant System.*

1. GIỚI THIỆU

Điều khiển quỹ đạo chính xác, đặc biệt là trong các tình huống chuyển làn hoặc bám làn, là một yêu cầu quan trọng đối với chuyển động an toàn và hiệu quả của xe tự hành. Trong số các kỹ thuật điều khiển tiên tiến, điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) có ưu điểm nổi trội nhờ khả năng xử lý các ràng buộc của hệ thống và tối ưu hóa hiệu năng điều khiển trong một khoảng thời gian dự đoán [1]. MPC đặc biệt phù hợp với các bài toán điều khiển phương tiện phức tạp, đòi hỏi sự cân bằng giữa độ chính xác bám quỹ đạo và các yếu tố như cảm giác của hành khách và giới hạn vật lý của xe [1, 2].

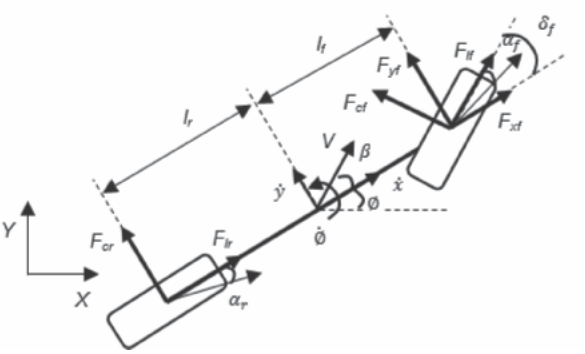
Các mô hình phức tạp như hệ thống biến thiên tuyến tính theo tham số (Linear Parameter-Varying - LPV) cho phép mô tả chính xác động học phi tuyến của xe dưới các điều kiện vận hành thay đổi. Tuy nhiên mô hình tuyến tính bất biến theo thời gian (Linear Time-Invariant - LTI) vẫn được coi là bước khởi đầu để đơn giản hóa bài toán thiết kế bộ điều khiển. Khi xem xét các chế độ vận tốc không đổi hoặc thay đổi chậm, mô hình LTI kết hợp với MPC (MPC-LTI) vẫn đem lại sự cân bằng hợp lý giữa độ phức tạp tính toán và hiệu quả điều khiển [3].

Phương pháp MPC-LTI đã được đưa ra trong nhiều nghiên cứu [1, 2, 3], tuy nhiên việc tinh chỉnh các tham số ma trận trọng số (Q, R, S) trong hàm chi phí của bộ điều khiển đóng vai trò quyết định đến chất lượng điều khiển. Chúng ảnh hưởng trực tiếp đến sự ưu tiên giữa việc giảm thiểu sai số bám quỹ đạo và hạn chế nỗ lực điều khiển (ví dụ: góc đánh lái), qua đó tác động đến độ ổn định và độ mượt của chuyển động.

Bài báo nghiên cứu nhằm ứng dụng và đánh giá bộ điều khiển MPC-LTI cho bài toán điều khiển chuyển làn của xe tự hành trong điều kiện vận tốc không đổi. Đóng góp chính của bài báo là khảo sát ảnh hưởng của việc điều chỉnh các ma trận trọng số Q, R và S trong hàm chi phí toàn phương của MPC đến hiệu suất bám quỹ đạo, độ mượt và sự ổn định của xe thông qua các mô phỏng với các quỹ đạo đặt ra. Mục tiêu là tìm ra một bộ tham số tối ưu, cung cấp cơ sở cho việc triển khai thực tế bộ điều khiển.

2. MÔ HÌNH HÓA VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

2.1. Mô hình động lực học ô tô



Hình 1. Mô hình động lực học ô tô 1 vết bánh xe

Trong nghiên cứu này, mô hình động lực học quay vòng ô tô 1 vết 2 bậc tự do (Bicycle model – 2 DOF) [2, 4] được xem xét để mô tả bài toán quỹ đạo chuyển động của xe (hình 1).

Thiết lập hệ phương trình động lực học theo phương ngang của xe [2, 4]:

$$\begin{cases} m\left(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\phi}\right) &= F_{yf} + F_{yr} \\ I_z\ddot{\phi} &= l_f F_{yf} - l_r F_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: m - Khối lượng của xe (toàn tải); I_z - Mô men quán tính của xe quanh trục ☞

thẳng đứng đi qua trọng tâm; Oxy - Tọa độ gắn với trọng tâm của xe; F_{yf}, F_{yf} - Lực ngang tác dụng lên lốp trước và lốp sau của xe; l_f, l_r - Khoảng cách từ tâm khối lượng của xe đến trục trước và trục sau.

Khi quay vòng dưới tác dụng của lực ly tâm, thông qua sự tương tác giữa bánh xe và mặt đường, phản lực ngang từ mặt đường tác dụng lên các bánh xe trước, sau được giả thiết tuyến tính hoá [4].

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{yf}\alpha_f \\ F_{yr} = C_{yr}\alpha_r \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: C_{yf}, C_{yr} và α_f, α_r lần lượt là hệ số độ cứng góc quay vòng và góc trượt ngang của bánh trước, sau. Các góc trượt ngang được xác định bởi các phương trình sau [4]:

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \tan\left(\frac{\dot{y}+l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) = \delta_f - \left(\frac{\dot{y}+l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) \\ \alpha_r = -\tan\left(\frac{\dot{y}-l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) = \left(\frac{\dot{y}-l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, $\delta_{f,r}$ là góc quay bánh xe dẫn hướng trước, sau. Ở đây, chỉ bánh xe trước dẫn hướng($\delta_r = 0$).

Việc xác định quỹ đạo chuyển động của xe được biểu diễn trong hệ quy chiếu quán tính với hệ trục tọa độ OXY, mối quan hệ giữa 2 hệ tọa độ:

$$\dot{Y} = \dot{x}\sin\phi + \dot{y}\cos\phi \quad (4)$$

Phương trình động lực học của xe theo phương ngang được biểu diễn lại:

$$\begin{cases} m(\ddot{y}+\dot{x}\dot{\phi}) = \left(C_{yf}\left(\delta_f - \frac{\dot{y}+l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) + C_{yr}\frac{\dot{y}-l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) \\ I_z\ddot{\phi} = \left(l_f C_{yf}\left(\delta_f - \frac{\dot{y}+l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) - l_f C_{yr}\frac{\dot{y}-l_r\dot{\phi}}{\dot{x}}\right. \end{cases} \quad (5)$$

Biểu diễn hệ phương trình trong không gian trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó, $x = [\dot{y}, \phi, \dot{\phi}, y]$, là vector trạng thái, y=[ϕ,y] là đầu ra của hệ thống, u=δ_f là đầu vào điều khiển, và A, B, C là các ma trận trạng thái, điều khiển và đầu ra, được cho bởi:

$$A = \begin{bmatrix} -2\frac{C_{yf}+C_{yr}}{m\dot{x}} & 0 & -\dot{x} - 2\frac{C_{yf}-C_{yr}}{m\dot{x}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -2\frac{C_{yf}-C_{yr}}{m\dot{x}} & 0 & -2\frac{C_{yf}l_f^2 - C_{yr}l_r^2}{m\dot{x}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2\frac{C_{yf}}{m} \\ 0 \\ 2\frac{C_{yf}l_f}{I_z} \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển MPC

Điều khiển dự báo mô hình (MPC) được lựa chọn do khả năng giải quyết hiệu quả các bài toán điều khiển tối ưu với nhiều ràng buộc, phù hợp cho hệ thống xe tự hành. Nguyên lý cơ bản của MPC là sử dụng mô hình động lực học của hệ thống để dự đoán các trạng thái tương lai trong một khoảng thời gian hữu hạn, gọi là chân trời dự đoán (N_p). Tại mỗi bước thời gian k, bộ điều khiển sẽ giải một bài toán tối ưu nhằm tìm ra chuỗi tín hiệu điều khiển tối ưu $\Delta u_{k+i/k}$ (i=0,...,N_{p-1}) bằng cách cực tiểu hóa một hàm chi phí, thường có dạng toàn phương [2, 3].

Hàm chi phí này phản ánh mục tiêu điều khiển, bao gồm việc giảm thiểu sai lệch giữa quỹ đạo dự đoán và quỹ đạo tham chiếu, đồng thời hạn chế nỗ lực điều khiển và thỏa mãn các ràng buộc vật lý của xe (ví dụ: giới hạn góc lái,

tốc độ thay đổi góc lái). Mô hình dự đoán được sử dụng trong bộ điều khiển MPC thực hiện việc rời rạc hóa của mô hình động lực học LTI đã được trình bày trong phương trình:

$$\begin{cases} X_{k+1} = A_d X_k + B_d u \\ Y_k = C_d X_k \end{cases} \quad (8)$$

Để tích hợp các ràng buộc lên tín hiệu điều khiển (góc quay bánh xe dẫn hướng δ) và tốc độ thay đổi của nó (Δδ) vào bài toán tối ưu một cách trực tiếp, kỹ thuật tăng cường trạng thái (state augmentation) được áp dụng. Vector trạng thái mới được định nghĩa là $\widetilde{X_k} = [X_k^T, \delta_{k-1}]^T$, và đầu vào mới là tốc độ thay đổi góc lái $\Delta u_k = \Delta\delta_k$. Mô hình dự đoán tăng cường (hàm chi phí) có dạng [2, 3]:

$$\begin{cases} \widetilde{X}_{k+1} = \widetilde{A}_d \widetilde{X}_k + \widetilde{B}_d \Delta\widetilde{u_k} \\ \widetilde{Y_k} = \widetilde{C}_d \widetilde{X}_k \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó, các biến trạng thái mới được bổ sung:

$$\widetilde{X_k} = \begin{bmatrix} X_k \\ \delta_{k-1} \end{bmatrix}; \widetilde{A} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I \end{bmatrix}; \widetilde{B} = \begin{bmatrix} B_d \\ I \end{bmatrix};$$
$$\widetilde{C} = [C_d \quad 0]; \widetilde{X_{k+1}} = \begin{bmatrix} X_{k+1} \\ \delta_k \end{bmatrix}; \quad (10)$$
$$\Delta u_k, \Delta u_{k+1}, \dots, \Delta u_{k+N_p-1}$$

2.3. Điều khiển tối ưu bằng hàm chi phí bậc 2

Việc tìm ra giá trị $\Delta\delta_k$ tối ưu cho mỗi bước thời gian cần phải dựa vào hàm chi phí bậc hai. Hàm điều khiển này thực hiện việc giảm đi sai số giữa giá trị quỹ đạo tham chiếu và giá trị dự đoán sao cho giá trị đầu ra của hàm (J) là nhỏ nhất [1, 2, 3, 5, 6].

$$e = Y_{ref} - Y_{pred}; \quad (11)$$

$$\min J = \frac{1}{2} e_{k+N}^T S e_{k+N} \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} [e_{k+i}^T Q e_{k+i} \Delta\delta_{k+i}^T R \Delta\delta_{k+i}] \quad (12)$$

$$st: X_{k+1} = A_d X_k + B_d u; \Delta u_{min} \le \Delta u \le \Delta u_{max}$$
$$u_{min} \le u \le u_{max} \quad (13)$$

Trong hàm chi phí (12), các ma trận trọng số Q, R, và S đóng vai trò quyết định đến hành vi của bộ điều khiển. Cụ thể như sau: Q xác định mức độ ưu tiên cho việc giảm thiểu sai số giữa quỹ đạo thực tế và quỹ đạo tham chiếu (Q lớn có nghĩa bộ điều khiển quan tâm nhiều vào việc giảm sai số bám quỹ đạo); R điều chỉnh nỗ lực điều khiển biên độ của góc lái δ (R tăng sẽ hạn chế sự thay đổi lớn của góc lái giúp chuyển hướng mượt hơn nhưng độ chính xác bám quỹ đạo có thể giảm); S đánh giá sai số cuối cùng tại chân trời dự đoán, giúp đảm bảo xe không chỉ bám quỹ đạo tốt mà còn đạt được trạng thái mong muốn ở cuối chân trời. Việc lựa chọn hợp lý các ma trận này giúp đóng vai trò quan trọng để đạt được sự cân bằng giữa độ chính xác và độ mượt của chuyển động.

Ở phương trình chi phí (minJ), e biểu thị sai số giữa giá trị kết quả tham chiếu và giá trị kết quả dự đoán tại miền thời gian phía trước. Cụ thể hơn $\frac{1}{2} e_{k+N}^T S e_{k+N}$ đánh giá mức độ ưu tiên của sai số kết quả cuối cùng trong chuỗi điều khiển. Trong khi đó, $e_{k+i}^T Q e_{k+i}$ đánh giá mức độ ưu tiên của sai số quá trình và $\Delta\delta_{k+i}^T R \Delta\delta_{k+i}$ đánh giá nỗ lực điều khiển. Qua biến đổi, đưa hàm J về dạng [3, 5, 6]:

$$J'' = \frac{1}{2} \Delta\delta_\sigma^T \bar{\bar{H}} \Delta\delta_\sigma + \begin{bmatrix} \widetilde{X_k}^T & \widetilde{r_\sigma^T} \end{bmatrix} \bar{\bar{F}}^T \Delta\delta_\sigma \quad (14)$$

Áp dụng hàm suy giảm độ dốc vào phương trình trên:

$$\Delta J'' = \bar{\bar{H}} \Delta\delta_\sigma + \bar{\bar{F}} \begin{bmatrix} \widetilde{X_k} \\ \widetilde{r_\sigma} \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

Từ đây tìm ra được chuỗi giá trị điều khiển để đưa vào mô hình động lực học của xe tự hành:

$$\Delta\delta_\sigma = -\bar{\bar{H}}^{-1}\bar{\bar{F}}\begin{bmatrix}\widetilde{X_k}\\ \widetilde{r_\sigma}\end{bmatrix} \quad (16)$$

3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

3.1. Các thông số cho mô phỏng

Các thông số của xe tự hành được sử dụng cho mô phỏng được đưa ra ở bảng 1.

Bảng 1. Thông số xe tự hành

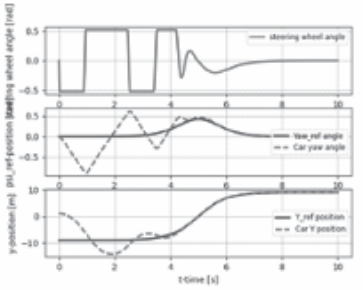
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
m	1500	l_f	2
I_z	3000	l_r	3
$C_{\alpha f}$	19000	ẋ	20
$C_{\alpha r}$	33000	hz	45

3.2. Mô phỏng và kết quả

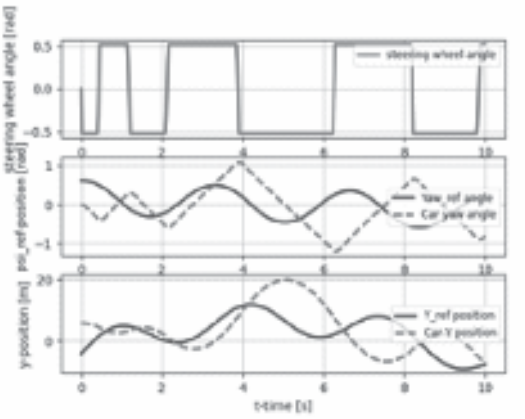
Mô phỏng với bộ tham số ban đầu trong MPC:

$$S=1\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\quad Q=1\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\quad R=1[1]; \quad (17)$$

Kết quả mô phỏng như thể hiện trên hình 2, 3.



Hình 2. [1] Mô phỏng 1 - Quỹ đạo đường cong.



Hình 3. [2] Mô phỏng 1 - Quỹ đạo đường sin.

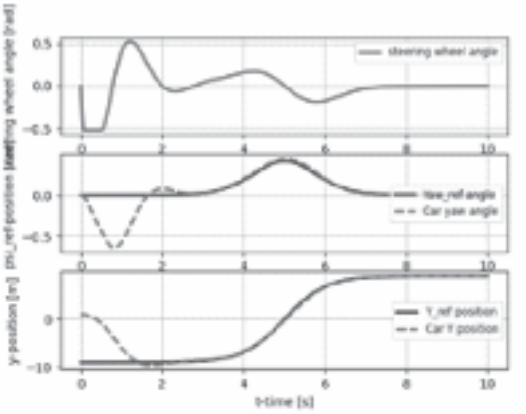
Nhận xét: Với bộ tham số bộ điều khiển gốc (17), bộ điều khiển trạng thái chuyển làn thực hiện tốt ở quỹ đạo cong nhưng tại quỹ đạo hình sin (yêu cầu đánh lái nhiều) kém hiệu quả.

*) Mô phỏng được điều chỉnh bộ tham số tối ưu trong MPC:

$$S=17.3e1\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix};\ Q=25.3e3\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix} \quad (18)$$

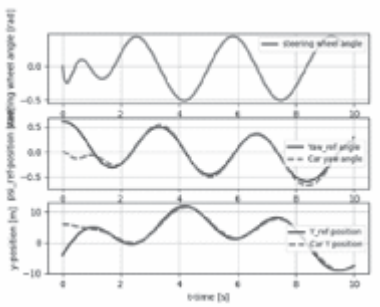
$$R=27.5e4[1]$$

Kết quả mô phỏng như thể hiện trên hình 4, 5.



Hình 4. [3] Mô phỏng 2 - Quỹ đạo đường cong.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



Hình 5. [4] Mô phỏng 2 - Quỹ đạo đường sin.

Nhận xét: Với bộ tham số tối ưu (18), bộ điều khiển MPC-LTI cho thấy sự cải thiện vượt trội trên cả hai loại quỹ đạo. Việc tinh chỉnh các ma trận trọng số (S, Q, R) giúp đạt được sự cân bằng tốt hơn giữa độ chính xác bám quỹ đạo và độ mượt của chuyển động. Đặc biệt, khả năng xử lý quỹ đạo hình sin – vốn đòi hỏi điều khiển phức tạp – được cải thiện đáng kể. Như vậy, việc hiệu chỉnh các tham số trong hàm chi phí góp phần cải thiện đáng kể hiệu suất của bộ điều khiển.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày việc thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển dự báo mô hình tuyến tính bất biến theo thời gian (MPC-LTI) cho bài toán điều khiển phương ngang (chuyển làn/bám làn) của xe tự hành với giả thiết vận tốc không đổi.

Kết quả mô phỏng trên các quỹ đạo tham chiếu bao gồm đường cong đơn giản và đường hình sin phức tạp, đã khẳng định vai trò quan trọng của việc lựa chọn các ma trận trọng số Q, R, và S trong hàm chi phí. Bộ tham số ban đầu cho thấy khả năng điều khiển chấp nhận được trên quỹ đạo đơn giản nhưng hiệu suất suy giảm đáng kể trên quỹ đạo hình sin, thể hiện qua sai số bám lớn và dao động trong tín hiệu điều khiển (góc lái). Ngược lại, sau khi thực hiện tối ưu hóa các trọng số này, bộ điều khiển MPC-LTI đã thể hiện sự cải thiện vượt trội. Khả năng bám theo quỹ đạo tham chiếu trở nên chính xác hơn đáng kể, đồng thời chuyển động của xe cũng mượt và ổn định hơn, ngay cả đối với quỹ đạo đòi hỏi sự thay đổi hướng liên tục.

Kết quả cho thấy, ngay cả trong khuôn khổ MPC-LTI với giả thiết vận tốc không đổi, việc hiệu chỉnh cẩn thận các tham số trong hàm chi phí là yếu tố quyết định để đạt được hiệu suất điều khiển mong muốn, cân bằng giữa độ chính xác và độ mượt. Nghiên cứu đã cung cấp một minh chứng thực tiễn về tiềm năng của phương pháp MPC-LTI và nhấn mạnh tầm quan trọng của bước hiệu chỉnh tham số điều khiển.

Hướng phát triển trong tương lai có thể tập trung vào việc mở rộng phương pháp sang sử dụng mô hình biến thiên theo tham số (MPC-LPV) với giả thiết vận tốc không đổi, cho phép bộ điều khiển thích ứng tốt hơn với các điều kiện vận hành thực tế đa dạng hơn.❖

Ngày nhận bài: **12/5/2025**
Ngày phản biện: **02/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Alcala, E., Puig, V., & Quevedo, J. (2019), "*LPV-MPC control for autonomous vehicles*". IFAC PapersOnLine, 52(28), 106-113.

[2]. Kebbati, Y., Puig, V., Ait-Oufroukh, N., Vigneron, V., & Ichalal, D. (n.d.), *"Optimized adaptive MPC for lateral control of autonomous vehicles*". IFAC-PapersOnLine. Manuscript submitted for publication.

[3]. Kebbati, Y., Ait Oufroukh, N., Vigneron, V., & Ichalal, D. (2022), "*Coordinated PSO-PID based longitudinal control with LPV-MPC based lateral control for autonomous vehicles*". 20th European Control Conference (ECC 2022) (pp. 518-523). London, United Kingdom.

[4]. H.B. Pacejka, (2008), "*Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*". International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, (August 2012), 37-41.

[5]. B. Zhang, C. Zong, G. Chen, and B. Zhang, "*Electrical Vehicle Path Tracking Based Model Predictive Control with a Laguerre Function and Exponential Weight*". IEEE Access, vol. 7, pp. 17082-17097, 2019.

[6]. Guo, D. Cao, H. Chen, Z. Sun, and Y. Hu, "*Model predictive path following control for autonomous cars considering a measurable disturbance: Implementation, testing, and verification*". Mech. Syst. Signal Process., vol. 118, pp. 41-60, 2019.

SO SÁNH CÁC CẤU HÌNH TRUYỀN LỰC Ô TÔ HYBRID (HEV)

A COMPARISON OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE (HEV) POWERTRAIN CONFIGURATIONS

Nguyễn Hùng Mạnh
Khoa Cơ khí - Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực
**Email: manhnh@epu.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo phân tích so sánh các cấu hình truyền động Hybrid phổ biến trên ô tô, bao gồm cấu hình nối tiếp, song song, nối tiếp-song song và phức hợp. Mỗi cấu hình được đánh giá dựa trên các tiêu chí hiệu năng và hiệu suất vận hành, bao gồm tỷ lệ công suất động cơ/mô-tơ, chế độ vận hành, hiệu suất truyền động, hiệu quả nhiên liệu, chi phí và độ phức tạp hệ thống. Kết quả nghiên cứu cho thấy mỗi cấu hình có những ưu nhược điểm riêng, phù hợp với các điều kiện vận hành và mục đích sử dụng khác nhau.

Từ khóa: *Ô tô điện Hybrid (Ô tô Hybrid); Truyền lực Hybrid nối tiếp; Truyền lực Hybrid song song; Truyền lực Hybrid nối tiếp - song song; Truyền lực Hybrid phức hợp.*

ABSTRACT

This paper presents the results of a comparative analysis of popular hybrid vehicle powertrain configurations, including series, parallel, series-parallel, and complex configurations. The evaluation is based on performance and operating efficiency criteria, including engine/motor power ratio, operating mode, transmission efficiency, fuel efficiency, cost, and system complexity. The results show that each configuration has its own advantages and disadvantages, suitable for different operating conditions and purposes.

Keywords: *Hybrid Vehicle (HEV); Series Hybrid Drive; Parallel Hybrid Drive; Series-Parallel Hybrid Drive; Complex Hybrid Drive.*

Chữ viết tắt:

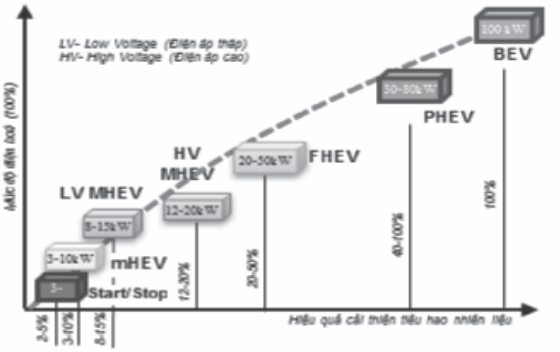
TT	Chữ viết tắt	Ý nghĩa
1	HEV (Hybrid Electric Vehicle)	Ô tô/ Xe Hybrid
2	BEV (Battery Electric Vehicle)	Ô tô thuần điện
3	ICE (Internal Combustion Engine)	Động cơ đốt trong

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ô tô dùng động cơ đốt trong (ICEV - Internal Combustion Engine Vehicle) hiện còn phổ biến trên toàn thế giới, chúng cũng là một trong số các nguồn phát thải khí nhà kính (CO_2) đáng kể [1]. Khí nhà kính là một trong số tác nhân trực tiếp gây biến đổi khí hậu toàn cầu. Mặt khác hiệu suất hoạt động của ICEV thường thấp hơn 30% [2]. Thế giới hiện nay đang có sự chuyển dịch mạnh sang sử dụng ô tô điện (BEV; HEV). BEV có ưu điểm không phát thải CO_2 khi hoạt động. Mặt khác hiệu suất hoạt động của chúng có thể đạt trên 90% [3]. Hiện nay, việc phổ biến loại xe này còn có những rào cản như: mật độ năng lượng của pin và phạm vi hoạt động của xe thấp; hạ tầng sạc pin còn thiếu; giá thành xe cao. HEV đang được quan tâm lớn và xem là bước chuyển hiệu quả tiến tới sử dụng hoàn toàn BEV. HEV sử dụng tối ưu hai nguồn động lực từ động cơ đốt trong và mô tơ điện. Tùy thuộc quan điểm thiết kế, tính năng vận hành, xe HEV có các hệ truyền động phổ biến bao gồm: nối tiếp; song song; nối tiếp - song song; phức hợp.

Một cách phân loại ô tô điện theo mức độ điện hóa như thể hiện trên hình 1.

Theo sự phân loại có: hybrid nhỏ (mHEV - micro Hybrid Electric Vehicle); hybrid nhẹ (MHEV - Mild Hybrid Hybrid Electric Vehicle); hybrid hoàn toàn (FHEV - Full Hybrid Electric Vehicle) và hybrid giắc cắm (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle) [2]. Mức độ điện hóa của mHEV là thấp nhất, mô tơ điện không bổ sung mô men quay tới các bánh xe. MHEV có sự bổ sung mô men quay từ mô tơ điện chiếm 10% và FHEV chiếm trên 40% [4].



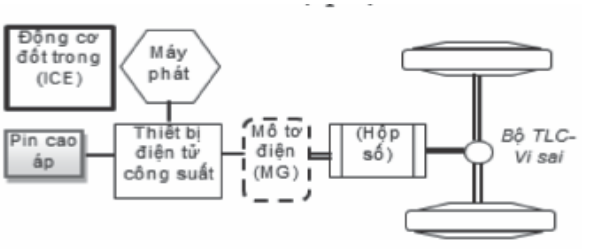
Hình 1. Phân loại ô tô điện (BEV, HEV)

Việc nghiên cứu phân tích so sánh các cấu trúc truyền động của ô tô HEV giúp sử dụng phương tiện một cách hiệu quả, an toàn, tiết kiệm nhiên liệu và có thể phục vụ cho những hướng nghiên cứu sâu tiếp theo.

2. CÁC CẤU HÌNH TRUYỀN LỰC CỦA HEV

2.1. Truyền lực hybrid nối tiếp

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực nối tiếp như thể hiện trên hình 2 [2].



Hình 2. Truyền lực Hybrid nối tiếp

Cấu trúc bao gồm: tổ hợp ICE và máy phát điện, mô tơ điện, pin cao áp, bộ truyền động giảm tốc cơ khí tới bánh xe, bộ chuyển đổi điện.

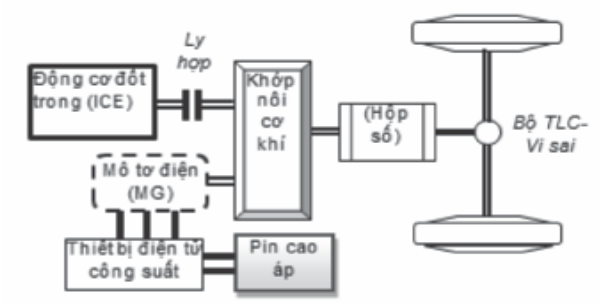
Trong cấu hình này, ICE chỉ có chức năng dẫn động máy phát để cung cấp điện trực tiếp cho mô tơ điện hoặc nạp ắc quy. Điều này có nghĩa duy nhất mô tơ điện đảm bảo 100% ☞

công suất yêu cầu để dẫn động các bánh xe chủ động. Mặt khác mô tơ điện có thể hoạt động ở chế độ máy phát để thu hồi năng lượng từ quá trình phanh (phanh tái sinh), sạc lại điện cho pin. Nguồn năng lượng cung cấp cho mô tơ điện có thể trực tiếp từ máy phát hoặc pin cao áp. ICE có thể không hoạt động ở một số trường hợp: dừng và khởi hành liên tục (chờ đèn tín hiệu giao thông); không tải; xuống dốc. Khác với ICEV, tốc độ quay của ICE có thể độc lập hoàn toàn đối với vận tốc của ô tô, cho phép ICE hoạt động ở vùng hiệu suất tối ưu.

Cấu hình nối tiếp có phạm vi ứng dụng hạn chế hơn so với các cấu hình khác, một số ít ứng dụng trên ô tô buýt điện. Ngoài ra, cấu hình này còn được sử dụng với xe điện mở rộng phạm vi hoạt động (EREV - Extended Range Electric Vehicle), ICE chỉ dùng để chạy máy phát sạc pin [5, 6].

2.2. Truyền lực hybrid song song

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực song song như thể hiện trên hình 3 [2].



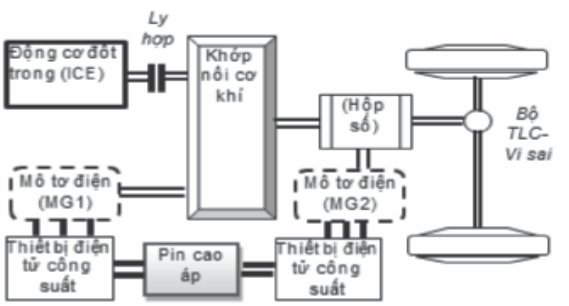
Hình 3. Truyền lực Hybrid song song

Trong cấu hình Hybrid song song, ICE và mô-tơ điện (MG) đều có khả năng truyền động trực tiếp đến bánh xe. Điều này cho phép xe vận hành linh hoạt: ICE hoạt động tương tự xe truyền thống, MG cung cấp lực kéo một cách riêng biệt hoặc phối hợp với ICE để tối ưu hiệu suất và tiết kiệm nhiên liệu. Bộ phận quan trọng khác biệt trong cấu hình này là khớp nối cơ khí. Chúng đóng vai trò thiết yếu trong việc kết hợp ICE và mô tơ điện. Có hai loại khớp nối chính: khớp nối mô men và khớp nối tốc độ. Khớp nối mô men, thường là bộ truyền bánh răng cố định trục, thực hiện chức năng tổng hợp mô men từ ICE và mô tơ điện, truyền đến bánh xe chủ động. Ngược lại, khớp nối tốc độ, có thể là bộ truyền bánh răng hành tinh hoặc chính mô tơ điện, đảm nhiệm việc điều phối tốc độ giữa ICE và mô tơ điện, tối ưu hóa hiệu suất hoạt động của hệ thống.

Khác với HEV sử dụng cấu hình nối tiếp, khi sử dụng cấu hình song song thường vẫn sử dụng hộp số truyền thống, ví dụ hộp số 6 đến 9 cấp. MG có thể được sử dụng để hỗ trợ ICE khi xe cần tăng tốc nhanh hoặc điều chỉnh công suất đầu ra của ICE tương thích với chế độ vận hành yêu cầu [5].

2.3. Truyền lực hybrid nối tiếp- song song

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực nối tiếp - song song như thể hiện trên hình 4 [2].



Hình 4. Truyền lực Hybrid nối tiếp - song song

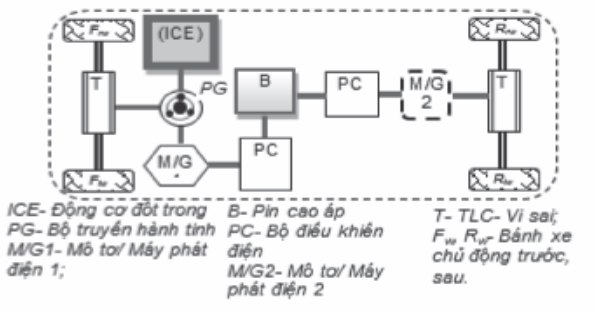
Cấu hình nối tiếp - song song kết hợp ưu điểm của cả hai cấu hình nối tiếp và song song. Chúng có khả năng thích ứng với đa dạng

các điều kiện làm việc, từ đó cải thiện hiệu suất hoạt động của hệ thống. Bộ phận quan trọng của cấu hình này là bộ chia công suất (khớp nối mô men - tốc độ). Khớp nối cho phép tách rời truyền lực từ ICE tới bánh xe trong một số chế độ vận hành, giúp ICE hoạt động ở vùng hiệu suất tối ưu (tương tự như cấu hình nối tiếp). Mặt khác, công suất từ ICE có thể được truyền trực tiếp đến bánh xe, như cấu hình song song. Khớp nối này thường sử dụng tổ hợp các bộ truyền bánh răng. Sự kết hợp này mở rộng dải hoạt động hiệu quả của xe trên toàn bộ phạm vi tốc độ. Tuy nhiên, hệ thống này đòi hỏi thuật toán điều khiển phức tạp và chi phí sản xuất cao [6]. Cấu hình này phổ biến trên các xe HEV hiện nay và được nhiều nhà sản xuất ô tô phát triển với các xe như: Toyota THS, Honda i-MMD, và BYD DM-i. Chúng cho thấy hiệu quả đáng kể trong việc tiết kiệm nhiên liệu và cải thiện hiệu suất tổng thể của xe.

2.4. Truyền lực hybrid phức hợp

Hệ truyền động Hybrid phức hợp ứng dụng trên xe dẫn động 4 bánh (4WD), là sự kết hợp giữa cấu hình nối tiếp - song song và thuần điện. Hai cấu trúc phổ biến bao gồm: trục trước Hybrid/trục sau thuần điện và ngược lại. Ưu điểm: Tối ưu lực kéo và hiệu suất nhờ dẫn động 4 bánh; Vận hành linh hoạt với hiệu suất cao; Giảm phát thải nhờ chế độ thuần điện; Tăng cường khả năng phanh tái sinh trên cả 4 bánh. Nhược điểm lớn nhất là cấu trúc và hệ thống điều khiển phức tạp [2, 6].

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực phức hợp như thể hiện trên hình 5 [2].



Hình 5. Truyền lực Hybrid phức hợp

3. SO SÁNH CÁC CẤU HÌNH TRUYỀN LỰC CỦA HEV

Để đánh giá toàn diện các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả hoạt động của HEV và so sánh giữa các cấu hình truyền động, nghiên cứu này đề xuất hai nhóm tiêu chí chính: Hiệu năng; hiệu suất và độ tin cậy vận hành [7, 8, 9, 10].

1) Hiệu năng: Nhóm này tập trung vào các thông số liên quan đến công suất, tính linh hoạt và hiệu quả sử dụng năng lượng của HEV, bao gồm:

- Tỷ lệ hỗ trợ công suất giữa MG và ICE: Phản ánh mức độ hỗ trợ của MG cho ICE, liên quan tới khả năng tăng tốc và điều kiện vận hành khác nhau.

- Chế độ vận hành: Đánh giá khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa các chế độ (thuần điện, hybrid, thuần ICE), ảnh hưởng đến hiệu suất và khả năng thích ứng của xe.

- Hiệu suất truyền động: Đo lường tổn thất năng lượng trong quá trình truyền lực, ảnh hưởng đến hiệu quả sử dụng năng lượng và khả năng vận hành của xe.

- Dung lượng và kích thước ắc quy: Xác định phạm vi hoạt động ở chế độ điện và khả năng cung cấp năng lượng cho mô tơ. ☞

2) Hiệu suất và độ tin cậy vận hành: Nhóm này tập trung vào hiệu quả tổng thể của hệ thống, bao gồm chi phí, độ phức tạp và tác động đến môi trường, bao gồm:

- Hiệu quả nhiên liệu và phát thải: Đánh giá mức tiêu thụ nhiên liệu và lượng khí thải, phản ánh tính kinh tế và tác động đến môi trường của xe.

- Chi phí sản xuất và vận hành: Xác định giá thành và chi phí vận hành xe.

- Độ phức tạp hệ thống: Đánh giá độ tin cậy, khả năng bảo trì và chi phí sửa chữa của xe.

Một số so sánh với các chỉ tiêu nói trên của các cấu hình truyền lực HEV thể hiện trên bảng 1, 2, 3.

Bảng 1. So sánh tỷ lệ công suất, thời gian hoạt động của ICE và MG [7, 8, 9, 10]

Thông số	Truyền lực nối tiếp	Truyền lực song song	Truyền lực nối tiếp - song song
Tỷ lệ công suất	MG: 100%, ICE: chỉ phát điện	ICE: Chủ yếu, MG: Hỗ trợ	Thay đổi linh hoạt, tùy chế độ hoạt động
Thời gian hoạt động ICE	Liên tục hoặc gần như liên tục để cung cấp năng lượng cho máy phát điện.	Phần lớn thời gian, đặc biệt ở tốc độ cao.	Có thể tắt hoàn toàn ở tốc độ thấp, hoạt động tối ưu khi xe chạy đường dài.
Thời gian hoạt động MG	Luôn hoạt động để dẫn động bánh xe.	Hỗ trợ ICE khi xe tăng tốc, leo dốc, tái tạo năng lượng.	Dẫn động xe ở tốc độ thấp, hỗ trợ ICE khi cần công suất lớn, và tái tạo năng lượng khi phanh.

Bảng 2. So sánh về mức tiết kiệm nhiên liệu, giảm phát thải các cấu hình truyền động HEV [7, 8, 9, 10]

Thông số	Truyền lực nối tiếp	Truyền lực song song	Truyền lực nối tiếp - song song
Tiết kiệm nhiên liệu	Tiết kiệm nhiên liệu đáng kể trong điều kiện vận hành đô thị (ICE hoạt động ở chế độ tối ưu;	Tiết kiệm nhiên liệu tốt trên đường trường, (ICE truyền tực tiếp công suất tới bánh xe).	Tiết kiệm nhiên liệu tốt, nhờ khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa chế độ nối tiếp và song song.
Giảm phát thải	Giảm phát thải tốt (ICE hoạt động ở chế độ tối ưu, ít thay đổi).	Giảm phát thải, đặc biệt khi kết hợp với mô tơ điện để tăng tốc.	Giảm phát thải, nhờ khả năng tối ưu hóa hoạt động của cả ICE và mô tơ điện.
Vận hành	Hiệu quả cao khi di chuyển trong phố, có thể kém hơn trên đường ngoài đô thị.	Tính linh hoạt cao, phù hợp với nhiều điều kiện vận hành.	Phức tạp hơn về mặt cấu trúc và điều khiển, nhưng mang lại hiệu quả cao.

Bảng 3. So sánh ưu, nhược điểm các cấu hình truyền động HEV [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

Truyền lực HEV	Ưu điểm	Nhược điểm	Phân tích
Nối tiếp	- Hệ thống đơn giản, ít thành phần cơ khí;	- Tổn thất năng lượng lớn do phải chuyển đổi năng lượng nhiều lần: từ nhiệt năng sang điện năng, từ điện năng sang động năng. - Cần mô tơ điện có công suất lớn để đáp ứng yêu cầu vận hành.	- ICE hoạt động chỉ lai máy phát điện, có thể hoạt động ở số vòng quay không đổi với mức tiêu thụ nhiên liệu thấp nhất, không phụ thuộc vào vận tốc thực tế của ô tô. Điều này nâng cao hiệu suất của ICE (có thể đạt gần giới hạn lý thuyết xấp xỉ 37%, với ICEV đạt dưới 30%). Việc chuyển đổi năng lượng nhiều lần làm giảm hiệu suất tổng thể.
Song song	Công suất truyền trực tiếp từ ICE đến bánh xe, giảm tổn thất so với loại nối tiếp	- Cấu trúc phức tạp hơn kiểu nối tiếp, cần các ly hợp và khớp nối cơ khí để kết nối và ngắt ICE và mô tơ điện - Hiệu suất của ICE có thể không tối ưu so với cấu hình nối tiếp vì phải thay đổi tốc độ theo yêu cầu vận hành.	- Cấu hình này hiệu quả hơn trên đường cao tốc so với cấu hình nối tiếp vì không cần biến đổi cơ năng của ICE thành điện năng. Tuy nhiên, hiệu suất tổng thể phụ thuộc vào việc điều khiển phối hợp giữa ICE và mô tơ điện. Khi chỉ một nguồn động lực làm việc, nguồn động lực còn lại hoạt động ở chế độ không tải hoặc không hoạt động.
Nối tiếp - song song	Kết hợp ưu điểm của cả hai cấu hình nối tiếp và song song, cho phép tối ưu hóa hiệu suất truyền động trong nhiều điều kiện vận hành.	- Cấu trúc phức tạp đòi hỏi hệ thống điều khiển phức tạp để quản lý tối ưu các nguồn động lực. - Hiệu suất trung bình của ICE có thể thấp hơn so với loại nối tiếp nhưng cao hơn loại song song.	Có khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa chế độ nối tiếp và song song và có thể tách rời truyền lực ICE tới bánh xe đáp ứng công suất đầu ra, qua đó tối ưu hóa lượng tiêu hao nhiên liệu. Trong hệ thống có thể xảy ra hiện tượng tuần hoàn công suất, dẫn đến tổn thất và làm giảm hiệu suất của hệ thống.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này phân tích toàn diện các cấu hình truyền lực ô tô Hybrid phổ biến hiện nay bao gồm: nối tiếp, song song, nối tiếp-song song và phức hợp. Mỗi cấu hình được đánh giá dựa trên các tiêu chí hiệu năng và hiệu suất vận hành, nhằm làm rõ ưu nhược điểm và phạm vi ứng dụng. Kết quả phân tích cho thấy:

Cấu hình nối tiếp phát huy tốt trong vận hành ở dải tốc độ thấp, hiệu suất của ICE được tối ưu hoá thông qua việc tách biệt cơ học với bánh xe. Tuy nhiên, hiệu suất tổng thể bị ảnh hưởng bởi quá trình chuyển đổi năng lượng nhiều giai đoạn.

Cấu hình song song cho hiệu suất cao ở dải tốc độ cao và khả năng truyền công suất trực tiếp từ ICE đến bánh xe. Tuy nhiên, sự phức tạp của hệ thống cơ khí và hiệu suất hạn chế ở dải tốc độ thấp là những nhược điểm của cấu hình này.

Cấu hình nối tiếp - song song phát huy hiệu quả linh hoạt và hiệu suất tối ưu trên phạm vi vận hành rộng, nhờ kết hợp ưu điểm của cả hai cấu hình trên. Tuy nhiên, hệ thống điều khiển phức tạp và chi phí sản xuất cao.

Cấu hình phức hợp có tích hợp hệ thống dẫn động thuần điện độc lập cho một trục, mở rộng phạm vi ứng dụng cho xe dẫn động bốn bánh, tối ưu hóa lực kéo và hiệu suất. Tuy nhiên, cấu trúc phức tạp và đòi hỏi yêu cầu cao về hệ thống điều khiển.

Nghiên cứu cũng đề xuất các tiêu chí đánh giá hiệu năng và hiệu suất vận hành, bao gồm tỷ lệ công suất ICE/MG, chế độ vận hành, hiệu suất truyền động, dung lượng ắc quy, hiệu quả nhiên liệu, chi phí và độ phức tạp hệ thống. Kết quả so sánh cho thấy mỗi cấu hình có những ưu nhược điểm khác nhau. Những phân tích so sánh này có thể cung cấp các thông tin kỹ thuật, công nghệ cần thiết liên quan đến các thành phần của hệ truyền động. Mặt khác, có thể được xem là tài liệu nghiên cứu tổng quan cho các lĩnh vực liên quan tới công nghệ truyền lực HEV. ❖

Ngày nhận bài: **15/4/2025**
Ngày phản biện: **05/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. TS. Nguyễn Hùng Mạnh, "*Công nghệ ô tô điện; Quyển 1 - Nhận dạng và sử dụng ô tô điện an toàn*". NXB. Xây dựng, 2024.

[2]. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, "*Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles*". CRC Press - USA, 3rd Edition, 2018.

[3]. M. Zhang, P. Suntharalingam, Y. Yang, and W. Jiang, "*Fundamentals of Hybrid Electric Powertrains*". Advanced Electric Drive Vehicles, CRC Press, 2014.

[4]. Amir Khajepour, Saber Fallah, Avesta Goodarzi, "*Electric and Hybrid Vehicles Technologies, Modeling and Control: A Mechatronic Approach*". John Wiley & Sons Ltd, 2014.

[5]. Huijun Yue, Jinyu Lin, Peng Dong, Zhinan Chen, Xiangyang Xu, "*Configurations and Control Strategies of Hybrid Powertrain Systems*". Energies 2023, 16, 725. https://doi.org/10.3390/.

[6]. Mohammad Shahroz, "*A Review on Hybrid Electric Vehicle Powertrains*". International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol 8, 2020.

[7]. Krishna Veer Singh, Hari Om Bansal, Dheerendra Singh, "*A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components*". J. Mod. Transport. 27, 77-107 (2019).

[8]. Rogelio León, Christian Montaleza, José Luis Maldonado, Marcos Tostado-Véliz, Francisco Jurado, "*Hybrid Electric Vehicles: A Review of Existing Configurations and Thermodynamic Cycles*". Thermo 1(2):134-150.

[9]. Ganta Yamini, Vasupalli Manoj, Darla Naga Sai Krishna, "*Hybrid Electric Vehicles, Architecture and Components: A Comprehensive Review*". International Journal of Research Publication and Reviews, Vol 3, no 10, pp 614-622, October 2022.

[10]. Huijun Yue,Jinyu Lin, Peng Dong, Zhinan Chen, Xiangyang Xu, "*Configurations and Control Strategies of Hybrid Powertrain Systems*". Energies 2023, 16(2), 725.

[11]. Priti Dinkar Dhigare, Dr. Sanjay, D. Yadav, "*A Review of Hybrid Electric Vehicle: A Trend and Advanced Technologies*". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 07 Issue: 05, 2020.

ỨNG DỤNG PHẦN MỀM WORKING MODEL PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA CẦU TRỤC MỘT DẦM

APPLICATION OF WORKING MODEL SOFTWARE IN THE DYNAMIC ANALYSIS OF A SINGLE-GIRDER OVERHEAD CRANE

ThS. **Đỗ Hữu Tuấn***, ThS. **Phùng Công Dũng**
Viện Cơ khí Động lực, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
**Email: tuandh@utt.edu.vn*

TÓM TẮT

Cầu trục là thiết bị nâng sử dụng phổ biến trong nhà xưởng, kho bãi. Trong quá trình làm việc, do tính chất của vật liệu chế tạo kết cấu và tải trọng tác dụng nên tạo ra dao động cho toàn bộ máy, nhất là quá trình xe con mang tải di chuyển trên dầm chính. Bài báo ứng dụng phần mềm Working Model để phân tích các dao động của cầu trục, từ kết quả phân tích của phần mềm sẽ lựa chọn được thông số làm việc hợp lý của thiết bị.

Từ khóa: *Cầu trục; Dao động kỹ thuật; Động lực học cầu trục; Ứng dụng phần mềm Working Model.*

ABSTRACT

Overhead cranes are commonly used in workshops and warehouses. During operation, due to the properties of the structural material and the applied loads, vibrations are generated throughout the machine, especially when the trolley carrying the load moves along the main girder. This paper applies the Working Model software to analyze the vibrations of the overhead crane. Based on the software's analysis results, optimal operating parameters for the equipment can be selected.

Keywords: *Overhead Crane; Mechanical Vibrations; Crane Dynamics; Application of Working Model Software.*

1. GIỚI THIỆU

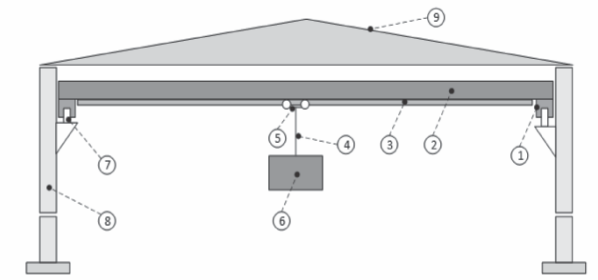
Cầu trục là một trong những thiết bị nâng hạ chuyên dụng, được sử dụng rộng rãi trong các nhà xưởng, khu công nghiệp và kho bãi [1, 2]. Tại Việt Nam, cầu trục đã được thiết kế và chế tạo trong nước, đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng của các ngành sản xuất. Trong quá trình thiết kế cầu trục, việc phân tích động học và xác định các đặc trưng dao động của hệ thống là yêu cầu thiết yếu nhằm đảm bảo hiệu quả hoạt động cũng như độ an toàn trong quá trình vận hành. Dao động của cầu trục phát sinh chủ yếu trong quá trình xe con nâng tải và đặc biệt rõ rệt khi xe con di chuyển dọc theo dầm chính. Những dao động này không chỉ ảnh hưởng đến độ chính xác khi làm việc mà còn có thể gây ra các vấn đề về mỏi kết cấu và mất an ☞

toàn cho người vận hành. Trong các nghiên cứu trước đây, nhiều tác giả đã tiếp cận vấn đề này thông qua việc xây dựng các mô hình toán học của hệ dao động nhiều bậc tự do [3, 4], đồng thời áp dụng các giả thiết tính toán phổ biến trong cơ học kỹ thuật [5, 6]. Các mô hình này tuy có độ chính xác cao nhưng thường đòi hỏi quá trình tính toán phức tạp. Nghiên cứu này đề xuất ứng dụng phần mềm mô phỏng động học Working Model để phân tích và đánh giá động lực học của cầu trục một dầm. Phần mềm cho phép mô phỏng trực quan các quá trình dao động và chuyển động của hệ thống thông qua các đồ thị và hình ảnh động [7].

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC BẰNG PHẦN MỀM

2.1. Cấu tạo chung của cầu trục một dầm

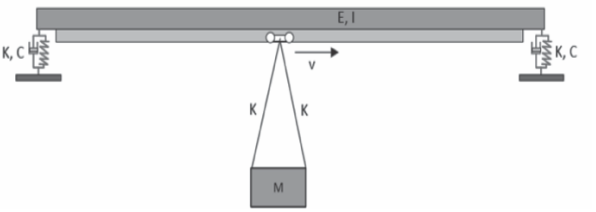
Cấu tạo chung của cầu trục một dầm sử dụng trong nhà xưởng được thể hiện trên hình 1. Kết cấu dầm chủ (2) được liên kết cứng với dầm đầu (1). Trên dầm chủ được hàn ray di chuyển xe con (3). Xe con (5) nâng hạ hàng (6) thông qua pa-lăng cáp (4). Toàn bộ cầu trục di chuyển trên ray (7) đặt trên hệ thống cột đỡ (8). Do cầu trục làm việc trong nhà xưởng nên sẽ không có tải trọng gió nhờ mái che số (9).



Hình 1. Cấu tạo chung của cầu trục một dầm
1 - Dầm đầu; 2 - Dầm chủ; 3 - Ray di chuyển xe con; 4 – Pa-lăng cáp5 - Xe con; 6 - Hàng nâng; 7 - Ray di chuyển máy; 8 - Cột xưởng; 9 - Mái xưởng

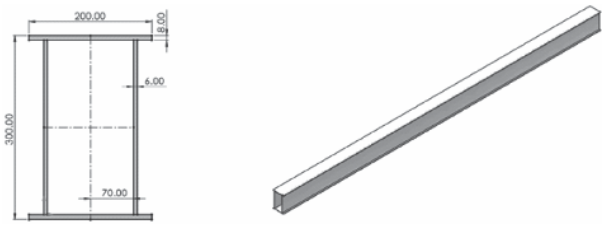
Trong quá trình hoạt động của cầu trục, sau khi nâng hàng đến chiều cao nâng nhất định, xe con sẽ di chuyển hàng dọc theo dầm chủ. Mặc dù hàng nâng có thể dao động trong hai mặt phẳng, tuy nhiên dao động trong mặt phẳng tải trọng thường có ảnh hưởng lớn hơn so với mặt phẳng còn lại. Chính vì vậy, trong bài báo này sẽ ứng dụng phần mềm để phân tích các trạng thái dao động trong mặt phẳng tải trọng.

2.2. Mô hình động lực học



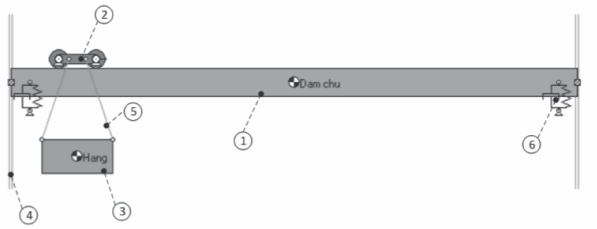
Hình 2. Mô hình động lực học của cầu trục một dầm

Mô hình động lực học của cầu trục thể hiện trên hình 2. Trên mô hình động lực học, dầm chính của cầu trục là vật biến dạng, đặt trên hệ đàn hồi được mô hình hóa bằng hệ lò xo-giảm chấn. Cáp thép của hệ pa-lăng nâng hàng được mô hình bằng phần tử đàn hồi. Mô hình được xét trong mặt phẳng tải trọng, khi xe con mang hàng di chuyển. So với phương pháp tính toán lý thuyết, cần phải thành lập các phương trình vi phân dao động của dầm chủ và hàng nâng trong các điều kiện làm việc khác nhau của cần trục sau đó giải hệ phương trình vi phân chuyển động của cơ hệ để tìm ra các đặc trưng của dao động. Phương pháp dùng phần mềm có ưu điểm không cần phải thành lập phương trình vi phân dạng tường minh, các phần tử trong phần mềm Working Model đã chứa sẵn các phương trình toán học. Để mô tả cơ hệ, cần lựa chọn và cài đặt đúng các tham số. Các thông số của kết cấu được mô tả ở bảng 1.



Hình 3. Thông số kích thước của dầm chủ

Mô hình động lực học xây dựng trong Working Model của cầu trục khi xe con di chuyển hàng nâng trên dầm chủ được thể hiện trên hình 4. Trong mô hình động lực học, liên kết trượt (4) đảm bảo dầm chủ chỉ có dao động theo phương thẳng đứng. Xe con (2) được dẫn động di chuyển bằng các mô tơ đặt tại các bánh xe. Cáp thép (5) là phần tử đàn hồi được nối với hàng nâng.



Hình 4. Mô hình động lực học trong phần mềm Working Model
1 - Dầm chủ; 2 - Xe con; 3 - Hàng nâng;
4 - Liên kết trượt
5 - Cáp nâng; 6 - Hệ lò xo-giảm chấn

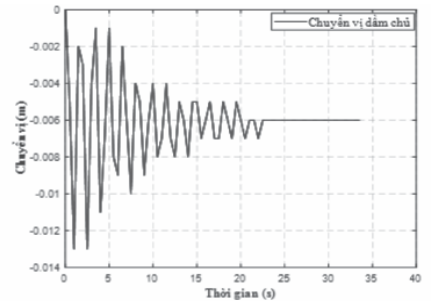
Bảng 1. Thông số mô phỏng của mô hình

Đối tượng	Tham số	Giá trị	Đơn vị
Dầm chủ	Mặt cắt	300*200*8*6	mm
	Chiều dài	6000	mm
	Vật liệu	SS400	-
	Khối lượng	311.24	kg
	Mômen quán tính khối	5.65	kg*m²
Hàng nâng	Kích thước	500*250*250	mm
	Khối lượng	245.31	kg
	Mômen quán tính khối	6.39	kg*m²
	Chiều cao nâng	1	m
Hệ lò xo-giảm chấn	Hệ số đàn hồi của lò xo (K)	500000	N/m
	Hệ số giảm chấn (C)	150	Ns/m
Xe con	Vận tốc di chuyển	5	m/phút

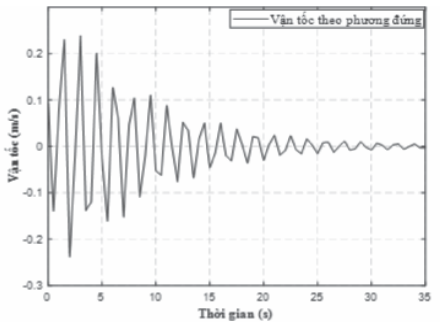
3. KẾT QUẢ VÀ NHẬN XÉT

3.1. Kết quả phân tích động lực học dầm chủ

Kết quả phân tích động lực học theo phương thẳng đứng của dầm chủ được thể hiện trên hình 5.



a)



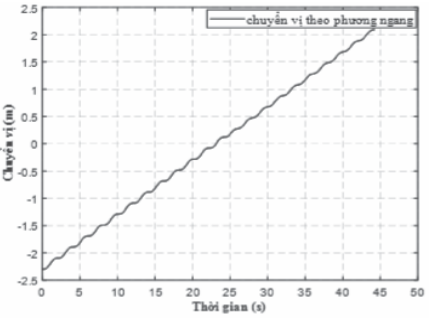
b)

Hình 5. Kết quả phân tích động lực học của dầm chủ
a) Chuyển vị đứng; b) Vận tốc theo phương đứng

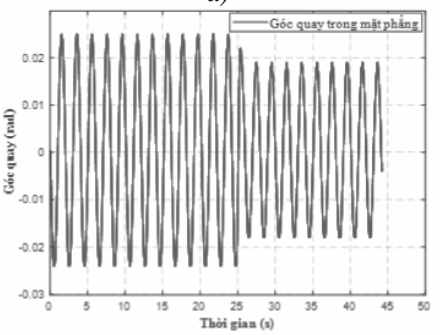
Từ kết quả có thể thấy, dao động của dầm chủ là động điều hòa tắt dần, kết cấu dao động rõ rệt tại thời điểm xe con mang hàng bắt đầu di chuyển trên dầm chính và tắt dần sau khoản 22 giây. Tuy nhiên khi xe con di chuyển, vận tốc của dầm vẫn thay đổi nhỏ.

3.2. Kết quả phân tích động lực học hàng nâng

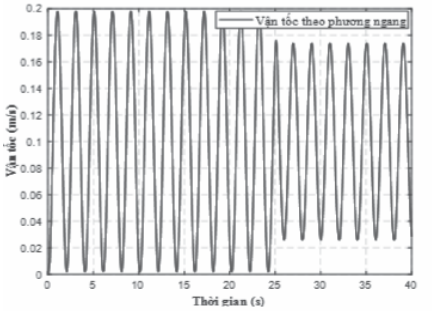
Trong quá trình xe còn di chuyển, sự dao động của hàng nâng cũng ảnh hưởng rõ đến dao động của toàn bộ máy. Kết quả phân tích dao động thể hiện ở hình 6.



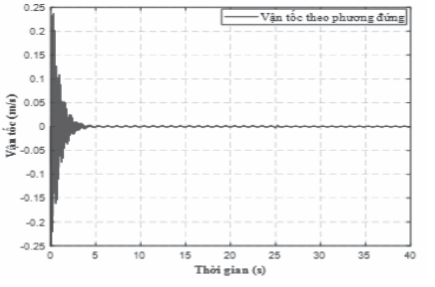
a)



b)



c)



d)

Hình 6. Kết quả phân tích động lực học của hàng nâng
a) Chuyển vị ngang; b) Góc quay;
c) Vận tốc chuyển vị ngang;
d) Vận tốc chuyển vị đứng

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

Có thể thấy, trong quá trình xe con mang hàng di chuyển, chuyển động lắc của hàng có ảnh hưởng đến chuyển vị của xe con (hình 6-a) làm cho chuyển vị có dao động nhỏ. Hàng nâng có dao động lắc trong mặt phẳng tải trọng (hình 6-b). Ngoài ra khi di chuyển, vận tốc của hàng theo phương ngang cũng có sự dao động (hình 6-c). Trong khi dao động theo phương đứng của hàng thể hiện rõ khi xe con mới bắt đầu di chuyển, và giảm dần khi xe con di chuyển ổn định (hình 6-d).

Như vậy, trong quá trình làm việc, do tính chất vật liệu chế tạo và tải trọng tác dụng, toàn bộ cơ hệ của cầu trục dao động trong mặt phẳng ngang, chuyển vị của dầm dao động lớn nhất khi xe con bắt đầu di chuyển và giảm dần khi xe con di chuyển ổn định. Trong quá trình chuyển động, hàng nâng có dao động lắc trong mặt phẳng tải trọng, chính chuyển động này làm cho vận tốc của hàng theo phương ngang cũng thay đổi trong suốt quá trình di chuyển hàng trên dầm chính. Các kết quả phân tích bằng Working Model thể hiện trực quan, dễ theo dõi. Có thể áp dụng phần mềm này đối với phân tích động lực học của các thiết bị nâng tương tự như cầu trục.❖

Ngày nhận bài: **15/5/2025**
Ngày phản biện: **11/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Văn Hợp, Nguyễn Thị Nghĩ, Lê Thiện Thành (2000), "*Máy trục vận chuyển*". NXB. Giao thông vận tải
[2]. Đỗ Hữu Tuấn, Bùi Văn Trầm, Phùng Công Dũng (2021), "*Máy nâng vận chuyển*". NXB. Xây dựng.
[3]. S S Enin, E Y Omelchenko, N V Fomin, A V Beliy, "*Overhead Crane Computer Model*". Materials Science and Engineering 327 (2018) 022028, doi:10.1088/1757-899X/327/2/022028.
[4]. G. D. Muscă (Anghelache) and S. Năstac, "*Dynamic modelling of overhead crane*". Materials Science and Engineering 916 (2020) 012071, doi:10.1088/1757-899X/916/1/012071.
[5]. Nguyễn Văn Khang, Nguyễn Phòng Điền (2024), "*Cơ học kỹ thuật*". NXB. Bách khoa Hà Nội.
[6]. Nguyễn Văn Khang (2017), "*Động lực học hệ nhiều vật*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[7]. Working Model 2D, Design Simulation Technologies.

ỔN ĐỊNH CỦA VÒNG ĐÀN HỒI CHỊU TẢI TRỌNG THỦY TĨNH

BUCKLING OF INEXTENSIBLE RINGS SUBJECT TO HYDROSTATIC LOADING

Hoàng Minh Tuấn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi, Bộ Nông nghiệp và Môi trường

Email: tmhoang@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Chúng tôi nghiên cứu hiện tượng mất ổn định của các vòng đàn hồi làm từ các sợi phi đối xứng và chịu tải thủy tĩnh. Đối với các vòng đàn hồi làm từ các sợi đối xứng, chúng mất ổn định thông qua biến dạng ngoài mặt phẳng tại các giá trị tải trọng tới hạn nhỏ hơn so với các giá trị đã biết trước đây. Đối với các vòng đàn hồi làm từ các sợi phi đối xứng, chúng mất ổn định thông qua sự kết hợp giữa biến dạng trong mặt phẳng và ngoài mặt phẳng tại các giá trị tải trọng tới hạn nhỏ hơn so với các giá trị tới hạn mà hiện tượng mất ổn định sẽ xảy ra nếu vòng dây làm từ sợi đối xứng. Tuy nhiên, hiệu ứng mất ổn định có thể được giảm bớt bằng cách tăng độ cứng xoắn tương đối so với độ cứng uốn.

Từ khóa: *Vòng đàn hồi; Mất ổn định; Tải trọng thủy tĩnh; Lý thuyết thanh.*

ABSTRACT

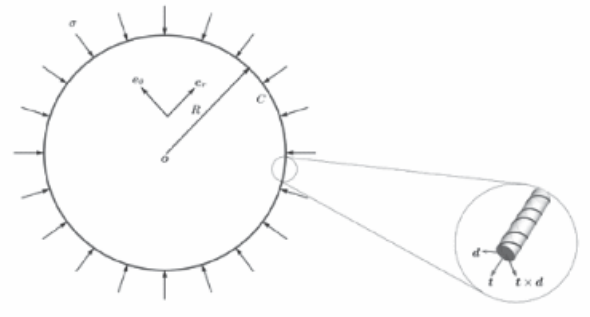
We study buckling of inextensible rings made from chiral filaments and subject to hydrostatic loading. For circular rings made from filaments without chirality, we find that they lose instability via out-of-plane bifurcation at critical values of loading smaller than those published. For circular rings made from filaments with chirality, they lose instability via coupling between in-plane and out-of-plane bifurcation at critical values of loading smaller than those at which bifurcation would happen without chirality. The destabilizing effect of chirality, however, can be reduced by increasing the twisting rigidity relative to the bending rigidity.

Keywords: *Elastic ring; Buckling; Hydrostatic loading; Rod theory.*

1. TỔNG QUAN

Hiện tượng mất ổn định của các vòng đàn hồi đóng vai trò quan trọng trong cơ học kết cấu, bắt đầu từ công trình tiên phong của Maurice Lévy vào cuối thế kỷ 19, khi nghiên cứu hiện tượng mất ổn định do uốn của vỏ trụ dài vô hạn chịu áp suất. Mất ổn định do uốn của các vòng dây có nhiều ứng dụng bao gồm thiết kế các vòng dây nano trong các thiết bị cấu trúc nano, thiết kế vỏ trụ trong các cấu trúc thành mỏng như nồi hơi, bình chịu áp lực, và nhiều ứng dụng khác.

Mất ổn định của các vòng đàn hồi dưới tác dụng của ba loại tải trọng chính gồm áp suất thủy tĩnh, tải trọng hướng tâm, và tải trọng cố định là một vấn đề quan trọng trong thiết kế kết cấu, vì các tải trọng phức tạp như sóng xung kích từ vụ nổ có thể được phân tích thành các loại tải trọng này. Mất ổn định của các vòng đàn hồi dưới tải trọng cố định – loại tải trọng luôn vuông góc với tiếp tuyến của đường giữa trong cấu hình chưa biến dạng – đã được nghiên cứu kỹ lưỡng [1].



Hình 1. Vòng đàn hồi làm từ sợi phi đối xứng chịu tải trọng thủy tĩnh.

Mất ổn định của các vòng đàn hồi dưới tải trọng hướng tâm – loại tải trọng luôn hướng về tâm cong ban đầu của vòng – cũng đã được nghiên cứu [2] và được kiểm chứng thực nghiệm gần đây [3]. Tuy nhiên, tất cả các tài liệu trước đó chỉ xem xét mất ổn định trong mặt phẳng. Dựa trên nghiên cứu [4] về hiện tượng mất ổn định của vòng nhớt đàn hồi dưới tải trọng hướng tâm – cho thấy kiểu uốn xoắn chiếm ưu thế trong mất ổn định. Gần đây, tác giả chỉ ra rằng các vòng đàn hồi mất ổn định thông qua mất ổn định ngoài mặt phẳng tại giá trị tới hạn của tải trọng nhỏ hơn so với mất ổn định trong mặt phẳng, từ đó khẳng định tầm quan trọng của mất ổn định ngoài mặt phẳng trong phân tích hiện tượng mất ổn định của vòng đàn hồi.

Ngược lại, mất ổn định của vòng đàn hồi dưới áp suất thủy tĩnh – loại tải trọng luôn vuông góc với tiếp tuyến của đường giữa của vòng ở cấu hình biến dạng – lại ít được nghiên cứu hơn [5], và ngay cả trong các nghiên cứu gần đây như [3], chỉ xem xét mất ổn định trong mặt phẳng. Trong nghiên cứu này, chúng tôi cho phép cả hai dạng mất ổn định và cho thấy rằng vòng đàn hồi dưới áp suất thủy tĩnh sẽ mất ổn định ngoài mặt phẳng tại giá trị tới hạn nhỏ hơn nhiều so với khi chỉ xem xét mất ổn định trong mặt phẳng.

Tính phi đối xứng trong các vòng đàn hồi đã được quan sát ở nhiều cấu trúc trên các quy mô khác nhau và tạo ra nhiều hiện tượng thú vị như sự liên kết giữa xoắn và giãn, hoặc giữa xoắn và uốn của sợi. Trong khi hiện tượng liên kết xoắn-giãn đã được nghiên cứu kỹ lưỡng [6] thì liên kết xoắn-uốn chỉ mới được nghiên cứu gần đây trong [7], mặc dù khái niệm này đã được giới thiệu trước đó. Lấy cảm hứng từ công trình [8] sử dụng liên kết xoắn-uốn để lý giải hiện tượng mất ổn định gấp khúc trong các vòng ADN, chúng tôi nghiên cứu ảnh hưởng của liên kết này đến hiện tượng mất ổn định của các vòng đàn hồi dưới tải trọng thủy tĩnh. Chúng tôi phát hiện rằng các vòng đàn hồi có tính phi đối xứng sẽ biểu hiện sự liên kết giữa ☞

mất ổn định trong và ngoài mặt phẳng tại giá trị tới hạn nhỏ hơn so với khi không có tính phi đối xứng.

2. LÝ THUYẾT ỔN ĐỊNH VÒNG ĐÀN HỒI

2.1. Lý thuyết thanh mảnh

Chúng tôi nghiên cứu vòng đàn hồi làm từ sợi dây phi đối xứng với đường tâm C và chịu tải trọng thủy tĩnh như hình vẽ 1. Phương trình của đường C trước khi mất ổn định có dạng:

$$\mathbf{r} = \mathbf{e}_r(\theta), \qquad 0 \le \theta \le 2\pi, \tag{1}$$

Trong đó, e_r là véc tơ đơn vị theo hướng bán kính và θ là góc cực. Gọi u, v, w là các chuyển vị dọc theo phương tiếp tuyến, phương bán kính và phương vuông góc với vòng đàn hồi, vị trí của một điểm vật liệu trên đường C sau khi mất ổn định có dạng:

$$\xi = (1+v)\mathbf{e}_r + u\mathbf{e}_\theta + w\mathbf{e}_3, \qquad \mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_\theta \tag{2}$$

Trong đó, e_θ là véc tơ đơn vị tiếp tuyến với đường C. Độ cong và độ xoắn của vòng đàn hồi có dạng:

$$\begin{aligned} \kappa^2 &= (1+2u'+v-v'')^2 + (u''-u+2v')^2 + w''^2, \\ \omega &= w'(1+u'-u'''-2v'') + w''(v'''-2v'-3u'') + w'''(1+v''-u') + \psi', \end{aligned} \tag{3}$$

Trong đó, ψ là góc xoay của tiết diện của vòng đàn hồi. Năng lượng biến dạng của vòng đàn hồi là:

$$V = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2}(\kappa^2 + \alpha\omega^2 + 2\eta\omega\kappa\cos\psi)d\theta \tag{4}$$

Với α tỷ số của độ cứng xoắn so với độ cứng uốn và η là tham số đặc trưng cho tính phi đối xứng của vòng đàn hồi. Công của tải trọng thủy tĩnh đặt lên vòng đàn hồi là:

$$W = -\nu\int_0^{2\pi} [v - uv' + \frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)]d\theta \tag{5}$$

Thế năng tổng của vòng đàn hồi chịu tải trọng thủy tĩnh như vậy có dạng:

$$E = V - W \tag{6}$$

2.2. Điều kiện cân bằng của vòng đàn hồi

Điều kiện cân bằng thu được bằng cách triệt tiêu biến phân cấp một của hàm thế năng tổng của vòng đàn hồi. Biến phân cấp một của năng lượng biến dạng của vòng đàn hồi có dạng:

$$\delta V = \int_0^{2\pi} [(\kappa + \eta\omega\cos\psi)\delta\kappa + (\alpha\omega + \eta\kappa\cos\psi)\delta\omega - \eta\omega\kappa\sin\psi\delta\psi]d\theta \tag{7}$$

Biến phân cấp một của công của tải trọng thủy tĩnh đặt lên vòng đàn hồi là:

$$\delta V = -\nu\int_0^{2\pi} [(1+(u'+v))\delta v + (u-v')\delta u + w\delta w]d\theta \tag{8}$$

Sử dụng biểu thức biến phân (7) và (8) để tìm biến phân cấp một của thế năng tổng (6) của vòng đàn hồi và triệt tiêu biến phân này, chúng tôi thu được điều kiện cân bằng:

$$\begin{cases} \lambda(u-v') - (\lambda(1+v+u'))' = \lambda(1+v+u')' + (\lambda(u-v'))' + \nu = 0, \\ (\lambda w')' = (\alpha\omega + \eta\kappa\cos\psi)' + \eta\kappa\omega\sin\psi = 0. \end{cases} \tag{9}$$

2.3. Điều kiện mất ổn định của vòng đàn hồi

Bây giờ chúng ta nghiên cứu ổn định của vòng đàn hồi có cấu hình cân bằng ổn định như sau:

$$u = v = w = 0, \qquad \kappa = \omega = \psi = 0. \tag{10}$$

Tuyến tính hóa điều kiện cân bằng (9) quanh cấu hình cân bằng ổn định (10), chúng tôi thu được điều kiện để cấu hình mất cân bằng phải thoả mãn:

$$\begin{cases} \alpha(w_1' + w_1''' + \psi_1') + \eta(u_1' + u_1''') = 0, \\ \nu w_1 - \eta(u_1'' + u_1'''') + (1+\nu)w_1'' + w_1'''' = 0, \\ -(\nu+1)u_1'' - (\nu+2)u_1'''' - u_1^{(6)} - \eta(2w_1'' + 3w_1'''' + w_1^{(6)} + \psi_1'' + \psi_1'''') = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Do tính đối xứng của vòng đàn hồi, chúng tôi giả sử cấu hình mất cân bằng có dạng sau:

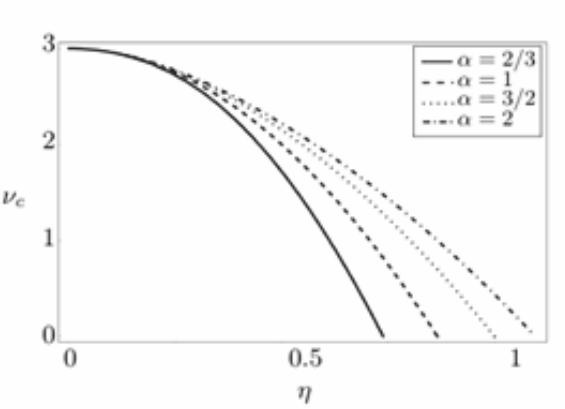
$$\begin{cases} u_1 = a_1 \sin n\theta, \\ w_1 = b_1 \sin n\theta, \\ \psi_1 = c_1 \sin n\theta. \end{cases} \quad (12)$$

Thay (12) vào (11), ta thu được một hệ phương trình thuần nhất cho 3 ẩn (a_1, b_1, c_1). Cấu hình cân bằng ổn định (10) sẽ mất ổn định nếu hệ phương trình thuần nhất nói trên có nghiệm không tầm thường. Triệt tiêu định thức của ma trận hệ số của hệ phương trình này, chúng tôi thu được điều kiện mất ổn định như sau:

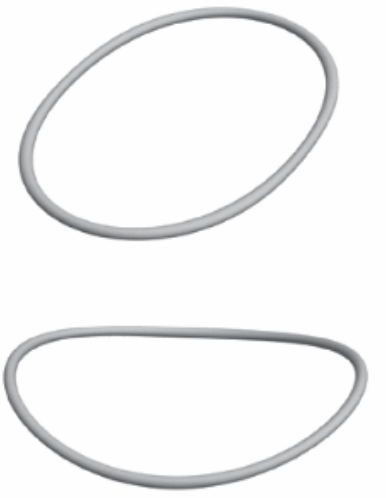
$$[(n^2-1)\left(1-\frac{\eta^2}{\alpha}\right)-\nu][n^2-\nu]=0. \quad (13)$$

3. KẾT QUẢ

Đồ thị thể hiện sự phụ thuộc của tải trọng thủy tĩnh tới hạn (13) vào tính phi đối xứng và vào tỷ số xoắn-uốn được trình bày trong Hình vẽ 2. Từ hình này, ta thấy khi η = 0, tức là vòng đàn hồi là đối xứng thì giá trị tới hạn nhỏ nhất của v không phụ thuộc vào tỷ số xoắn-uốn và bằng 3. Tại giá trị tới hạn của tải trọng, vòng đàn hồi biến dạng thành vòng phẳng không tròn như minh họa trong hình vẽ thứ 3 (hình vẽ trên). Ngoài ra, khi η ≠ 0, tức là vòng đàn hồi là phi đối xứng, ta thấy rằng tính phi đối xứng có ảnh hưởng giống nhau đến hiện tượng mất ổn định của vòng đàn hồi. Cụ thể, với một giá trị của tỷ số xoắn-uốn cho trước, đường cong biểu thị sự phụ thuộc của tải trọng thủy tĩnh tới hạn (13) là đối xứng qua trục tung phản ánh thực tế rằng các giá trị tới hạn của v chỉ phụ thuộc vào mức độ phi đối xứng chứ không phụ thuộc vào kiểu phi đối xứng, bất kể đó là phi đối xứng trái η < 0 hay phi đối xứng phải η > 0. Mặt khác, đường cong biểu thị sự phụ thuộc của tải trọng thủy tĩnh tới hạn (13) giảm đơn điệu khi mức độ phi đối xứng tăng, điều này hàm ý rằng tính phi đối xứng có tác dụng làm mất ổn định và dẫn đến hiện tượng rẽ nhánh xảy ra tại các giá trị tới hạn của v thấp hơn so với trường hợp các vòng đàn hồi được làm từ sợi đối xứng.



Hình 2. Sự phụ thuộc của tải trọng thủy tĩnh tới hạn vào tính phi đối xứng và vào tỷ số xoắn-uốn



Hình 3. Hình dáng của vòng đàn hồi sau khi mất ổn định cho hai trường hợp vòng đối xứng (bên trên) và phi đối xứng (bên dưới)

Hơn nữa, tại giá trị tới hạn của tải trọng, vòng đàn hồi biến dạng thành vòng không phẳng như minh họa trong hình vẽ thứ 3 (hình vẽ dưới). Cuối cùng, đường cong biểu thị sự phụ thuộc của tải trọng thủy tĩnh tới hạn (13) tương ứng với một giá trị nhỏ của tỷ số xoắn-uốn sẽ nằm dưới các đường cong tương ứng với các giá trị lớn hơn của tỷ số xoắn-uốn, cho thấy ảnh hưởng giảm thiểu tính mất ổn định của tỷ số xoắn-uốn α. Do đó, ta đi đến kết luận hợp lý về mặt trực giác rằng việc tăng độ cứng xoắn so với độ cứng uốn sẽ giúp chống lại ảnh hưởng có thể gây mất ổn định do tính phi đối xứng.

4. KẾT LUẬN

Chúng tôi vừa sử dụng cách tiếp cận biến phân để nghiên cứu ổn định của vòng đàn hồi phi đối xứng chịu tải trọng thủy tĩnh. Với vòng đàn hồi đối xứng, giá trị tới hạn của tải trọng thủy tĩnh là 3 và vòng đàn hồi biến dạng thành vòng phẳng không tròn. Với vòng đàn hồi phi đối xứng, mặt khác, giá trị tới hạn của tải trọng thủy tĩnh nhỏ hơn 3 và phụ thuộc vào mức độ phi đối xứng cũng như vào tỷ số xoắn-uốn của vòng đàn hồi. Tại giá trị tới hạn (<3) của tải trọng, vòng đàn hồi biến dạng thành vòng không phẳng.❖

Ngày nhận bài: **02/4/2025**
Ngày phản biện: **14/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. J.Singer, C. Babcock, "*On the buckling of rings under constant directional and centrally directed pressure*". Journal of Applied Mechanics, 37 (1) (1970), 215-218.

[2]. E. Albano, P. Seidel, "*Bifurcation of rings under concentrated centrally directed loads*". ASME Journal of Applied Mechanics, 40 (2) (1973), 553-558.

[3]. M. Gaibotti et. al., "*Effects of different loading on the bifurcation of annular elastic rods*". International Journal of Nonlinear Mechanics, 165 (2024).

[4]. M. Naschie andA. Nashai, "*Influence of Loading Behavior on the Post Buckling of Circular Rings*". AIAA Journal, 17 (2) (1976), 266-267

[5]. P. Seidel, E. Albano, "*Bifurcation of circular rings under normal concentrated loads*". ASME Journal of Applied Mechanics, 40 (1) (1973), 233-238.

[6]. T. Healey, C. Papdopoulos, "*Bifurcation of hemitropic elastic rods under axial thrust*". Quarterly of Applied Mathematics LXXI (2013), 729-753.

[7]. Hoang Minh Tuan, "*Influence of chirality on buckling and initial postbuckling of inextensible rings subject to central loadings*". International Journal of Solids and Structures, 172-173 (2019), 97-109.

[8]. Z. Wei et.al., "*Kink instability in circular DNA studied as Helfrich chiral chains*". Physical Review E, 58 (1998).

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA XÂM THỰC TRONG KHAI THÁC VẬN HÀNH CHÂN VỊT SERI B BẰNG PHƯƠNG PHÁP QUAN SÁT VẾT SƠN

A STUDY OF CAVITATION EFFECTS IN THE OPERATION OF A B-SERIES PROPELLER BY PAINTING TEST METHOD

Trương Việt Anh*, Lê Thị Thái
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
**Email: anh.truongviet@hust.edu.vn*

TÓM TẮT

Để đảm bảo an toàn, tuổi thọ khai thác và hiệu suất thủy lực của chân vịt, xâm thực trong chân vịt tàu thủy luôn được quan tâm nghiên cứu trong nhiều năm qua. Hiện tượng xâm thực với sự "nổ" của các bọt khí/đám mây xâm thực tạo ra các xung áp suất cao có thể gây rung động, tiếng ồn ô nhiễm và đặc biệt là có thể gây ra phá hủy, ăn mòn bề mặt cánh. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đặc tính xâm thực của mẫu chân vịt seri B khi vận hành ở các số vòng quay khác nhau, trong đó sử dụng kỹ thuật khảo sát qua vết sơn bị phá hủy để đưa ra các kết luận về vùng bề mặt cánh có nguy cơ bị ăn mòn, phá hủy bởi xâm thực. Các vùng nguy cơ bị ăn mòn xâm thực quan sát được tương ứng với các hiện tượng xâm thực xuất phát từ tương tác xoáy đỉnh cánh và xâm thực bề mặt do dòng chảy tách thành ở mép cánh mà đã được biết tới ở các nghiên cứu trước đây. Ở tốc độ vòng quay cao, xâm thực phát triển và tác động trên diện rộng của bề mặt cánh chân vịt seri B và tác động đến lực đẩy của chân vịt. Khi xâm thực phát triển, hệ số lực đẩy bị suy giảm mạnh. Nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế xâm thực tác động lên chân vịt dạng seri B.

Từ khóa: *Chân vịt seri B; Xâm thực; Ăn mòn xâm thực; Phương pháp quan sát vết sơn.*

ABSTRACT

To ensure the safety, service life and hydraulic efficiency of propellers, cavitation phenomena in ship propellers has always been interested to research over the years. The phenomenon of "implosion" of cavitation bubbles/clouds creates high pressure pulses that can cause vibration, noise pollution and especially cavitation erosive damage on the material surface of the propeller. This paper presents the experimental results in studying of the erosive cavitation damage in a B-series propeller model by using the painting test method to draw out the blade surface areas where is in possibility of erosive cavitation damage. The observed erosive areas is quite suitable with the cavitation phenomena caused by the tip vortex and the tip vortex flow separating from the leading edge of the blade as previous researchs. At high rotation speeds, erosive damage area develops and affects in a large area of the blade surface of the propeller. At developed cavitation condition, thrust coefficient of the propeller is declined significantly. The study contributes to clarifying the erosion mechanism in operation of the B series propeller.

Keywords: *B-series propeller; Cavitation; Erosion damage; Painting test method.*

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Chân vịt seri B là một dạng thiết bị động lực sử dụng phổ biến trong phương tiện thủy với chức năng tạo lực đẩy khi vận hành tàu. Trong quá trình hoạt động, sự thay đổi trong dải rộng của tốc độ vòng quay chân vịt tạo ra sự thay đổi về chế độ dòng chảy bao cánh thường dẫn đến sự xuất hiện các hiện tượng xâm thực. Trong nhiều năm qua, các dạng xâm thực trong chân vịt tàu thủy nói chung, chân vịt seri B nói riêng được các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng [1], [2], làm rõ cơ chế hình thành xâm thực xoáy đỉnh cánh, xâm thực ở mép vào cánh và dòng chảy bao tách thành, xâm thực bề mặt cánh dưới dạng "sheet/partial cavitation" và đám mây bọt xâm thực – cloud cavitation. Ở những tốc độ vòng quay lớn, cánh chân vịt được bao bọc bởi bọt khí siêu xâm thực (supercavitation) kết hợp đám mây xâm thực tạo ra sức phá hủy mạnh mẽ [3]. Sự ăn mòn, phá hủy của xâm thực đối với bề mặt cánh liên quan đến tuổi thọ, sức bền vật liệu cũng luôn là chủ đề quan trọng. Các nghiên cứu thường sử dụng kỹ thuật camera tốc độ cao quan sát vị trí và vùng phá vỡ của đám mây bọt khí xâm thực [4], quan sát bề mặt vật liệu [5] hay vết lớp phủ bề mặt bằng sơn hoặc lớp phủ vật liệu [6].

Nghiên cứu này sử dụng hệ thí nghiệm đơn giản để đánh giá vùng nguy cơ chịu sự ăn mòn, phá hủy của xâm thực và đặc tính lực đẩy của chân vịt theo tốc độ vòng quay và trạng thái xâm thực, chỉ ra các đặc điểm ảnh hưởng của xâm thực đối với mẫu cánh được khảo sát. Phương pháp sử dụng khảo sát vùng tác động của xâm thực qua vết sơn được áp dụng để dự báo nguy cơ xâm thực trong vận hành mẫu chân vịt dạng seri B.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

2.1. Hệ thống thử nghiệm

Phương án thí nghiệm được thiết lập thử với bể có mặt thoáng trình bày ở Hình 1. Để quan sát xâm thực, trên thành bể ngang với vị trí chân vịt, cửa sổ quan sát được tạo ra bằng thủy tinh hữu cơ dày 25 mm đảm bảo chịu được áp lực nước trong bể. Xâm thực được quan sát trực tiếp và thông qua kỹ thuật phủ sơn để tìm vết xâm thực phá hủy trên bề mặt cánh chân vịt.

Để đo lực đẩy chân vịt, ta sẽ bố trí động cơ tải chân vịt đặt trên một trục quay để có thể đo sức đẩy thông qua hệ phương trình mô-men. Thiết bị đo lực đẩy loadcell sẽ được trình bày ở phần thiết bị bể thử, nhóm nghiên cứu đã xây dựng phần mềm hiển thị trên máy tính khi đo đạc. Thí nghiệm tiến hành như sau:

(1) Quan sát trạng thái xâm thực bằng camera.

(2) Vận hành ở các chế độ vòng quay, khảo sát vùng nguy cơ chịu sự ăn mòn xâm thực bề mặt cánh bằng kỹ thuật quan sát vết sơn.

(3) Đo lực đẩy của chân vịt khi động cơ vận hành tại vận tốc khác nhau, qua đó xây dựng được đặc tính quan hệ giữa lực đẩy và trạng thái xâm thực khi vận hành. Thiết bị đo lực sử dụng cảm biến Loadcell PST-A của hãng Keli kiểu chữ Z, độ tin cậy và chính xác cao (sai số dưới 0,3%).

Mẫu chân vịt được thiết kế theo Seri B và chế tạo CNC bằng hợp kim nhôm như ở Hình 2. Các thông số về chân vịt xem ở Bảng 1. Để đánh giá về trạng thái xâm thực, nghiên cứu sử dụng số xâm thực Thomas dựa trên số vòng quay và đường kính chân vịt, xác định theo công thức sau:

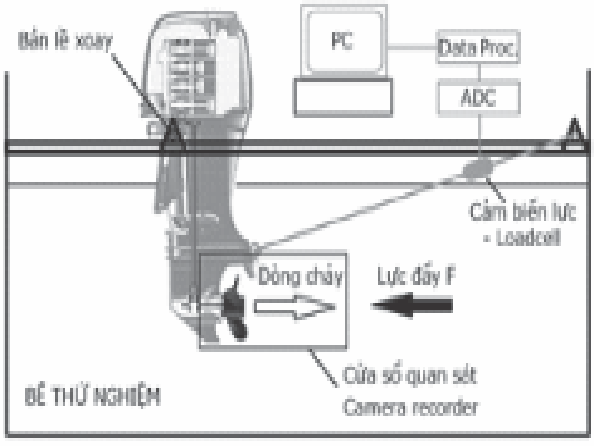
$$\sigma_n = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho(\frac{n}{60})^2 D^2} \quad (1)$$

Trong đó, p là áp suất tĩnh theo độ sâu đặt chân vịt (tính theo vị trí trục chân vịt), P_v = 3169 [Pa] là áp suất hơi bão hòa của nước ở nhiệt độ thí nghiệm (nhiệt độ nước là 25°C), D [m] là đường kính chân vịt, vận tốc vòng của chân vịt n [v/ph], ρ = 1000 kg/m^3 là khối lượng riêng của nước.

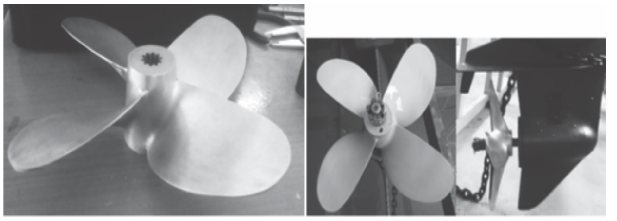
Hệ số lực đẩy chân vịt được tính toán theo công thức:

$$K_t = \frac{F_{cv}}{\rho(\frac{n}{60})^2 D^4} \quad (2)$$

Trong đó, K_t là hệ số lực đẩy chân vịt, F_{cv} [N] là lực đẩy chân vịt.



Hình 1. Sơ đồ thí nghiệm



Hình 2. Mẫu chân vịt seri B

Bảng 1. Các thông số hình học chân vịt

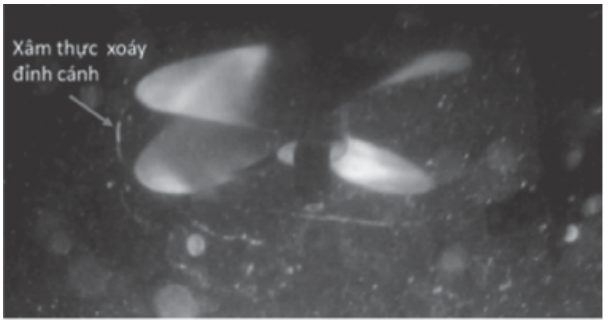
Thông số	Trị số
Đường kính chân vịt D (m)	0,245
Đường kính bầu	0,04
Số cánh Z	4
Vật liệu	Alumi
Dải tốc độ vòng quay chân vịt n [v/ph]	500-3000 [v/ph]

Thí nghiệm được tiến hành với việc điều khiển động cơ theo % tay ga để chân vịt chạy ở các tốc độ vòng quay khác nhau trong dải từ 500 v/ph đến 3000 v/ph, kết hợp quan sát bằng camera ở chế độ 60 hình/giây và đo đạc lực đẩy bằng loadcell (PST-A Keli). Thí nghiệm quan sát vết xâm thực sử dụng kỹ thuật sơn phủ bề mặt cánh chân vịt cho mỗi lần vận hành. Sau thời gian vận hành 2 phút, mẫu cánh được mang ra để quan sát vết vùng sơn bị phá hủy, đánh giá tỷ lệ bề mặt vùng bị phá hủy.

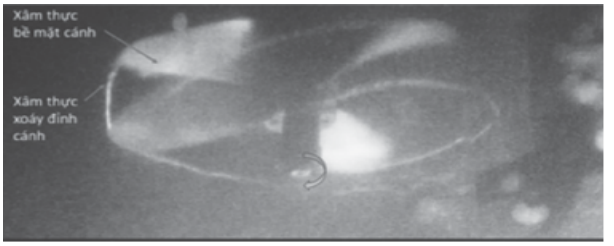
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Quan sát đặc điểm dòng chảy xâm thực

Trong điều kiện thí nghiệm còn hạn chế, việc sử dụng camera chụp ảnh chỉ quan sát được rõ hiện tượng xâm thực xoáy đỉnh cánh. Kết quả cho thấy xâm thực không xuất hiện khi tốc độ vòng quay dưới 760 v/ph. Bắt đầu từ tốc độ vòng quay 760 v/ph, xâm thực xoáy đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện với vết xoáy xâm thực liên tục kéo dài khoảng ¼ vòng đường kính đỉnh chân vịt (Hình 3a). ☞

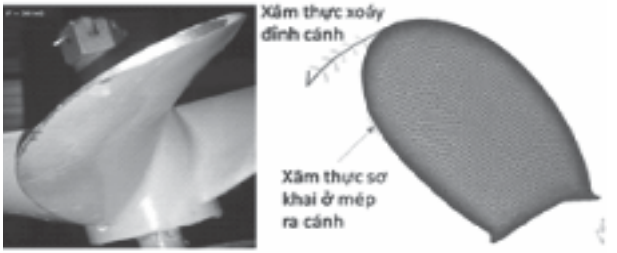


(a) Xâm thực xoáy đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện ở n = 760 v/ph, σ_n = 20,1

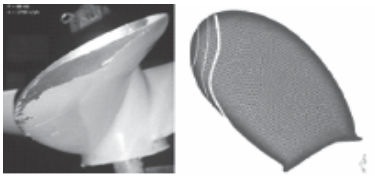


(b) Xâm thực xoáy đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện ở n = 1285 v/ph, σ_n = 7,03

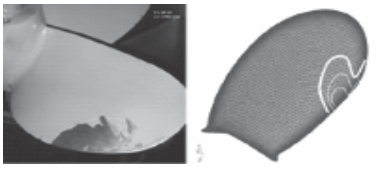
Hình 3. Quan sát xâm thực bằng camera



(a) n = 840 v/ph, F_{cv} = 245 N, σ_n = 16,5

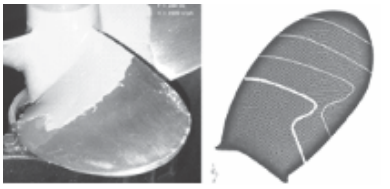


Lưng cánh

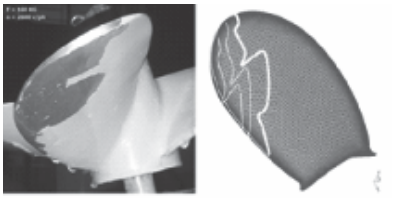


Bụng cánh

(b) n = 1700 v/ph, F_{cv} = 653,7 N; σ_n = 4,02



Bụng cánh



Lưng cánh

(c) n = 2600 v/ph, F_{cv} = 1307,5 N; σ_n = 1,72

Hình 4. Vùng chịu tác động của xâm thực theo vết sơn trên cánh chân vịt

Khi tốc độ vòng quay chân vịt tăng lên, xâm thực xoáy đỉnh cánh phát triển và kéo dài vết xâm thực kéo dài vết hướng hạ lưu (Hình 3b). Tuy nhiên, khi chân vịt quay tốc độ cao và xâm thực phát triển mạnh thì việc quan sát bằng camera khó khăn, nhất là xâm thực trên bề mặt cánh.

Khắc phục nhược điểm của camera, ta sử dụng phương pháp phủ sơn và quan sát vết. Qua đó có thể xác định được trạng thái xâm thực và vùng xâm thực tác động trên bề mặt cánh. Trước khi thí nghiệm, chân vịt được phủ kín và đều lớp sơn mịn (Hình 3). Việc thí nghiệm vận tiến hành ở các giá trị vận tốc quay chân vịt trong dải từ 500 v/ph đến tối đa 3000 v/ph. Ở mỗi lần thử nghiệm, thời gian vận hành chân vịt tại giá trị vận tốc là 2 phút. Khi chưa có xâm thực bề mặt (n < 840 v/ph, σ_n > 16,5), lớp sơn không bị bong tróc. Khi bắt đầu có xâm thực trên bề mặt cánh, kết quả dòng chảy xâm thực đã để lại vết phá hủy lớp sơn bảo vệ bề mặt.

Quá trình phát triển của xâm thực bắt đầu từ xoáy đỉnh cánh và bọt khí xuất phát từ xâm thực ở mép vào cánh rồi bị phá vỡ ở vùng

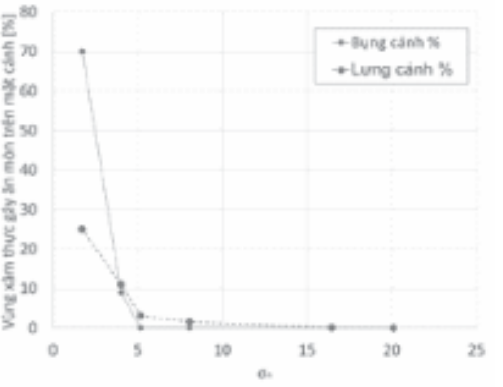
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

lưng mép ra đỉnh cánh ở số xâm thực σ_n = 16,5 (Hình 4a) và tiếp tục phát triển khi σn tiếp tục giảm. Ở Hình 4b, khi σ_n = 4.02, có thể thấy xâm thực trên mẫu chân vịt xuất phát từ mép vào cánh và vùng phá vỡ loang rộng dần ra 2 mặt cánh theo dạng tấm và các đám mây xâm thực tách ra từ xâm thực dạng này đã gây ra vùng phá hủy ở vùng mép ra của cả hai mặt cánh.

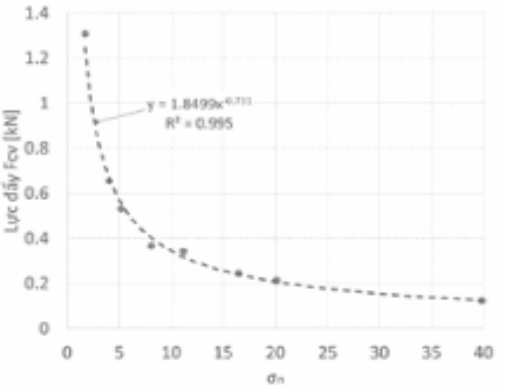
Hình 4c là hình ảnh vết ăn mòn xâm thực trên bề mặt cánh chân vịt khi σ_n = 1,72 và tốc độ vòng quay n = 2600 v/ph. Có thể thấy vùng nguy cơ ăn mòn chiếm đến xấp xỉ 70% bề mặt đẩy của cánh (bụng cánh) và gần 30% diện tích bề mặt lưng cánh ở phía mép ra. Việc xác định diện tích có thể có sai số nhất định, nhưng kết quả khảo sát qua vết sơn cho phép dự báo được xu thế phát triển vùng bề mặt cánh có nguy cơ bị phá hủy xâm thực ở Hình 5. Có thể thấy, vùng vết sơn bị phá hủy ở mặt bụng cánh phủ rộng khi xâm thực phát triển và rộng hơn đáng kể so với ở lưng cánh.

3.2. Đặc tính động lực đẩy

Để đánh giá đặc sự ảnh hưởng của xâm thực đối với hiệu quả tạo lực đẩy của chân vịt, ta tiến hành đo lực kéo ở các chế động vòng quay chân vịt thay đổi như đã trình bày về hệ thống thí nghiệm ở mục 2, Hình 1. Kết quả đo lực đẩy chân vịt F_{cv} cho thấy quan hệ hàm số mũ theo giá trị số xâm thực thể hiện ở Hình 6. Khi giá trị σ_n < 10, các giá trị lực đo trong thực tế có sự dao động. Nguyên nhân có thể xuất phát chính từ sự không ổn định do xâm thực phát triển mà mà minh chứng là sự loang rộng của vùng vết sơn bị phá hủy đã trình bày ở mục 3.1.



Hình 5. Ước tính dự báo vùng nguy cơ ăn mòn xâm thực trên cánh chân vịt

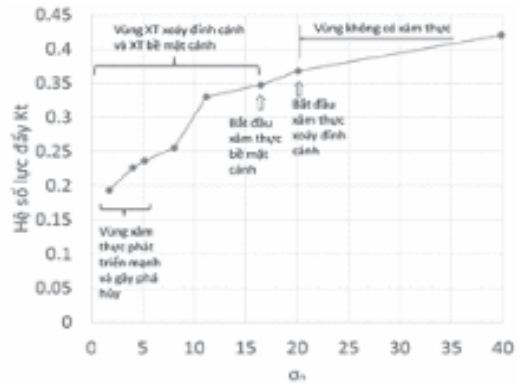


Hình 6. Quan hệ lực đẩy và hệ số xâm thực

Khi giá trị σ_n = 1,72, trạng thái xâm thực khi đó ứng với vết sơn bị phá hủy loang rộng tới 70% bề mặt bụng cánh. Sự phát triển bao phủ của xâm thực trên mặt cánh giúp ma sát thủy động trên bề mặt, qua đó giảm lực cản để chân vịt có thể gia tăng lực đẩy. Hiệu ứng này có lợi cho các chân vịt ứng dụng xâm thực để tăng hiệu quả lực đẩy của chân vịt ở tốc độ vòng quay lớn. Tuy nhiên, xâm thực phát triển có thể gia tăng nguy cơ phá hủy xâm thực và làm giảm tuổi thọ, phá hủy chi tiết cánh, và là vấn đề tiếp tục cần nghiên cứu để tối ưu thiết kế.

Hình 7 là mối quan hệ giữa hệ số lực đẩy K_t và số xâm thực σ_n. Khi σ_n < 10, sự phát triển của xâm thực làm giảm hiệu suất của lực đẩy đáng kể. Mặc dù khi xâm thực phát triển, ☞

lực đẩy có thể gia tăng như ở đồ thị Hình 6, nhưng về hiệu quả năng lượng thông qua hệ số K_t cho thấy sự suy giảm đáng kể. Có thể xác định giá trị của hệ số lực đẩy thông qua quan hệ hàm số mũ.



Hình 7. Đặc tính quan hệ giữa hệ số lực đẩy K_t và số xâm thực

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm khảo sát về vùng ảnh hưởng của xâm thực có thể gây nguy cơ phá hủy bề mặt cánh, kết hợp đo lường lực đẩy của chân vịt ở các tốc độ vòng quay khác nhau. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra một số kết luận sau:

(i) Xâm thực đỉnh cánh bắt đầu xuất hiện ở $\sigma_n = 20,1$, xâm thực bề mặt cánh bắt đầu phát triển khi $\sigma_n = 16,5$; trong khoảng $\sigma_n > 5$, nguy cơ phá hủy bởi xâm thực chưa đáng kể;

(ii) Khi $\sigma_n \leq 5$, xâm thực trên bề mặt cánh bắt đầu phát triển và tác động phá hủy. Theo vết sơn, vùng chịu tác động ở mặt lưng sớm hơn ở mặt bụng và tập chung ở khu vực mép ra cánh chân vịt;

(iii) Khi $\sigma_n \leq 1,7$, xâm thực gây tác động phá hủy rộng trên hầu như toàn bộ bề mặt bụng cánh (70% bề mặt), vùng tác động này rộng hơn đáng kể so với mặt lưng cánh (25% bề mặt);

(iv) Đối với mẫu chân vịt seri B được khảo sát, quan hệ giá trị lực đẩy của chân vịt có thể xác định theo hàm số mũ của số xâm thực để tính toán gần đúng theo công thức:

$$F_{cv} = 1.85\sigma_n^{-0.731}$$

Nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế xâm thực có tác động phá hủy lên cánh chân vịt dạng seri B. Với phương pháp vết sơn, kết quả hiện tại đang là dự báo ban đầu về vùng chịu ảnh hưởng xâm thực. Các nghiên cứu tiếp theo có thể xem xét về cường độ và thời gian xâm thực tác động để làm rõ các vấn đề vật liệu, sức bền, tuổi thọ chi tiết cánh dưới sự ảnh hưởng, tác động của xâm thực.❖

Ngày nhận bài: **20/5/2025**
Ngày phản biện: **10/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Andreas Peters et al., *"Numerical prediction of cavitation erosion on a ship propeller in model- and full-scale*". Wear, Volumes 408-409, Aug., 2018, Pages 1-12.

[2]. Yanan Wang et al., "*Effect of Blade Number on Tip Vortex Cavitation of Propeller*". J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13(5), 915; https://doi.org/10.3390/jmse13050915 .

[3]. Alessandro Capone et al., "*Flow and Cavity Measurements in a Super-Cavitating Propeller*". J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 243. https://doi.org/10.3390/jmse12020243.

[4]. Afaq Ahmed Abbasi et al., "*Experimental analysis of blade root cavitation erosion on set of model propellers*". Ocean Engineering, Volume 311, Part 1, 1 November 2024, 118766.

[5]. Bu-Geun Paik et al., "*Test method of cavitation erosion for marine coatings with low hardness*". Ocean Engineering, Volume 38, Issue 13, September 2011, Pages 1495-1502.

[6]. Muhammad Yusvika et al., "*Achievements in Observation and Prediction of Cavitation: Effect and Damage on the Ship Propellers*". 6th International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICIMECE 2020), Procedia Structural Integrity 27 (2020), 109-116.

NUMERICAL BUCKLING ANALYSIS OF LAMINATED COMPOSITE WING-SHAPED PLATES WITH BOX-TYPE STIFFENERS UNDER UNIFORM COMPRESSION

PHÂN TÍCH SỐ ỔN ĐỊNH CỦA TẤM COMPOSITE NHIỀU LỚP DẠNG CÁNH MÁY BAY VỚI GÂN HỘP DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI NÉN ĐỀU

Bui Van Binh
Electric Power University
Email: binhbv@epu.edu.vn

ABSTRACT

Composite wing-shaped plates reinforced with box-type stiffeners offer superior damage tolerance and high impact energy absorption. Due to their numerous advantages, the effect of geometric shapes, fiber orientation, and material properties on the buckling resistance of such structures remains a subject of continuing research interest among many scientists. This study performs a numerical buckling analysis of such structures using a finite element approach based on Reissner–Mindlin plate theory. The home-made Matlab programming using rectangular eight-noded isoparametric plate elements with five degrees of freedom per node was built to compute linear buckling loads and corresponding mode shapes.

Keywords: *Composite wing-shaped plates; Box-type stiffeners; Linear buckling; Reissner–Mindlin plate theory.*

TÓM TẮT

Tấm composite dạng cánh máy bay được gia cường bằng các gân hình hộp thể hiện khả năng chịu hư hỏng vượt trội và khả năng hấp thụ năng lượng va đập cao,... Chính vì có nhiều ưu điểm nên ảnh hưởng của hình dạng hình học, góc sợi và đặc tính vật liệu đến khả năng chịu mất ổn định của các kết cấu này vẫn đang được quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học. Nghiên cứu này thực hiện phân tích mất ổn định bằng phương pháp số đối với các kết cấu nói trên, dựa trên lý thuyết tấm Reissner–Mindlin với chương trình phần tử hữu hạn tự phát triển trên nền tảng Matlab. Mô hình sử dụng phần tử tấm đẳng tham số tám nút với năm bậc tự do tại mỗi nút để tính toán tải trọng mất ổn định tuyến tính và các dạng mất ổn định tương ứng.

Từ khóa: *Tấm composite dạng cánh máy bay; Gân gia cường dạng hộp; Ổn định tuyến tính; Lý thuyết tấm Reissner–Mindlin.*

☞

1. INTRODUCTION

Fiber-reinforced composite plates have emerged as a class of advanced engineering materials due to their superior strength-to-weight ratio, excellent corrosion resistance, and outstanding mechanical performance. These characteristics have led to their widespread adoption in various engineering sectors, including aerospace, automotive, marine, and civil engineering. In aerospace applications in particular, composite wing-shaped plates reinforced with box-type stiffeners are extensively utilized in the construction of structural components such as aircraft wings, fuselage panels, and interior elements, contributing significantly to weight reduction, improved fuel efficiency, and enhanced overall structural performance.

To meet the increasing demand for lightweight and high-performance structures, substantial research has been devoted to the analysis of the mechanical behavior of composite and stiffened plates. A range of analytical and numerical methods has been developed to investigate their static, dynamic, and stability responses under various loading conditions and geometric configurations. These studies have provided valuable insights for the design and optimization of advanced composite structures.

Recent research has focused on different aspects of composite plate behavior. For instance, Zhao et al. [1] studied the buckling behavior of stiffened rectangular plates using the finite element method based on first-order shear deformation theory, highlighting the effect of stiffener layout, curvature, and fiber orientation. Shi et al. [2] investigated the influence of initial imperfections, impact loads, and torsional stiffness of stiffeners on the dynamic response of stiffened plates using an analytical approach based on large-deflection theory. Lijuan et al. [3] employed the variational asymptotic method to develop an equivalent model for analyzing the static and dynamic responses of hemispherical convex–concave composite plates, addressing the effect of laminate layup and geometric configuration. Mohamed et al. [4] used the energy principle and first-order shear deformation theory to formulate the governing equations for helicoidally laminated composite plates, emphasizing the roles of fiber orientation and material properties. Wang et al. [5] explored free vibration in stiffened plates with and without cutouts, applying Reissner–Mindlin and Timoshenko beam theories in combination with the Nitsche method for patch coupling. Pereira and Donadon [6] investigated static, vibrational, and aeroelastic behaviors of composite plates using the modified consistent element-free Galerkin method. Bera et al. [7] conducted a comparative buckling study using classical plate theory and various higher-order shear deformation theories to assess the performance of isotropic and orthotropic plates. Z. Jing et al. [8] proposed a three-dimensional buckling analysis of stiffened plates with complex geometries using the energy element method, demonstrating its flexibility and accuracy.

Despite these advances, studies focusing on the compressive buckling behavior of wing-shaped laminated composite plates with integrated box-type stiffeners remain limited. This research gap is particularly evident in the Vietnamese academic context. To address this, the present study conducts a comprehensive numerical investigation on the linear buckling behavior of wing-shaped laminated composite plates reinforced with box-type stiffeners. The

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

analysis systematically examines the effect of geometric parameters, material properties, and fiber orientation angles on the critical buckling loads and associated mode shapes. A finite element model based on Reissner–Mindlin plate theory is developed to perform the analysis. The outcomes of this study are expected to contribute to the structural design and optimization of lightweight composite components for aerospace applications.

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

2.1. The strain-displacement relations

According to the Reissner-Mindlin plate theory [9], the displacements (u, v, w) are referred to those of the mid-plane (u_0, v_0, w_0) as:

$$\begin{aligned} u(x,y,z,t) &= u_0(x,y,t) + z\theta_x(x,y,t) \\ v(x,y,z,t) &= v_0(x,y,t) + z\theta_y(x,y,t) \\ w(x,y,z,t) &= w_0(x,y,t) \end{aligned} \quad (1)$$

Here, t is time, θ_x and θ_y are the total rotations, ϕ_x and ϕ_y are the constant average shear deformations about the y and x-axes, respectively.

The z-axis is normal to the xy-plane that coincides with the mid-plane of the laminate positive downward and clockwise with x and y.

2.2. Finite element formulations

In laminated plate theories [9], the membrane {N}, bending moment {M} and shear stress {Q} resultants can be obtained by integration of stresses over the laminate thickness. The stress resultants-strain relations can be expressed in the form:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{ij}] & [B_{ij}] & [0] \\ [B_{ij}] & [D_{ij}] & [0] \\ [0] & [0] & [F_{ij}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\kappa\} \\ \{\gamma^0\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Where:

$$\left([A_{ij}],[B_{ij}],[D_{ij}]\right) = \sum_{k=1}^{n} \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left([Q'_{ij}]_k\right)(1, z, z^2)dz$$

(i, j = 1, 2, 6) (3)

$$[F_{ij}] = \sum_{k=1}^{n} f \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left([C'_{ij}]_k\right)dz; \quad f = 5/6;\ i,j = 4, 5 \quad (4)$$

n: Number of layers, h_{k-1}, h_k: The position of the top and bottom faces of the k^{th} layer.

$[Q'_{ij}]_k$ and $[C'_{ij}]_k$: Reduced stiffness matrices of the k^{th} layer (see [9]).

In the present work, eight nodded isoparametric quadrilateral element with five degrees of freedom per nodes is used. The displacement field of any point on the mid-plane given by:

$$\begin{aligned} &u_0 = \sum_{i=1}^{8} N_i(\xi,\eta).u_i;\ v_0 = \sum_{i=1}^{8} N_i(\xi,\eta).v_i;\ w_0 = \sum_{i=1}^{8} N_i(\xi,\eta).w_i; \\ &\theta_x = \sum_{i=1}^{8} N_i(\xi,\eta).\theta_{xi};\ \theta_y = \sum_{i=1}^{8} N_i(\xi,\eta).\theta_{yi} \end{aligned} \quad (5)$$

Where: $N_i(\xi, \eta)$ are the shape function associated with node i in terms of natural coordinates (ξ, η).

The eigenvalue type of buckling equation can be expressed as in the following steps by dropping force terms and conceded to:

$$\{[K] + \lambda_{CR}[K_G]\}\{\Delta d\} = \{0\} \quad (6)$$

Where, $[K_G]$ is the geometric stiffness ☞

matrix; {Δd} is the displacement increment vector and λ_{CR} is the critical mechanical load at which the structure buckles; [M], [K] are the global mass matrix, stiffness matrix, respectively.

3. NUMERICAL RESULTS

3.1. The composite wing-shaped plate

Consider a composite wing-shaped plate is shown in Figure 1; the dimensions of W = 0.8(m), l_i = 0.15(m) and a = 0.045 (m); total thickness of t = 7.25(mm), tapered angles of φ = 30°, 40°, 45°. Laminated scheme of [θ°/-θ°/θ°/-θ°/θ°]. The plate subjected to a uniform knife-edge loading of q (N/m) along its edge of AB towards the direction of y-xis. Material properties given in Table 1, Table 2 and Table 3.

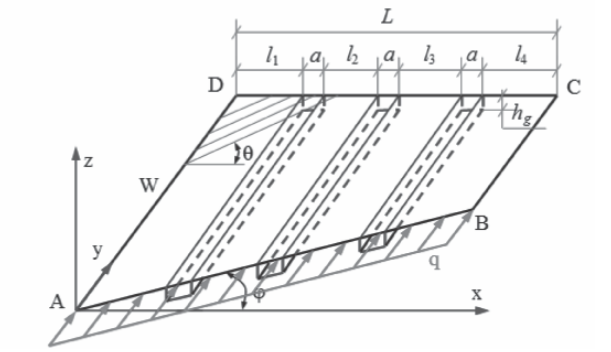


Figure 1. The composite wing-shaped plate with three box-type stiffeners under uniform compression

Table 1. Carbon fiber T700 material properties (MAT 1)

E_1 (GPa)	E_2, E_3 (GPa)	$G_{12,13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)	$\upsilon_{12,13}$	υ_{23}	ρ (kg/m^3)
165	15	6.4	5.5	0.286	0.366	1611

Table 2. Woven fabric composite material properties (MAT 2)

E_1, E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	$G_{12,13,23}$ (GPa)	υ_{12}	υ_{13}	υ_{23}	ρ (kg/m^3)
63.8	11.0	4.2	0.064	0.064	0.32	1523

Table 3. Graphite/epoxy AS4/3502 material properties (MAT 3)

E_1 (GPa)	E_2, E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	$G_{13,23}$ (GPa)	υ_{13}	$\upsilon_{12,23}$	ρ (kg/m^3)
131	9.12	7.1	5.92	0.24	0.34	1600

Boundary conditions:

- At edge DC: u = v = w = θx = θy = θz = 0 (except stiffeners).

- At edges AD and BC: u = v = 0.

The non-dimensional buckling load parameter is defined as follows: $\lambda^*_{CR} = \dfrac{\lambda_{CR} L^2}{E_2 t^3}$.

3.2. Effect of taper angles

The geometric shape of the wing-shaped plate (taper angle) significantly influences the structural stability. In this subsection, to investigate the effect of taper angles on the buckling load, the laminated wing-shaped plates with laminated scheme of [45°/-45°/45°/-45°/45°] are considered for different taper angles of φ = 15°, 25°, 35°, 45°. The

material properties shown in Table 1 (MAT 1); Comparative results corresponding to various taper angles are shown in Figure 2.

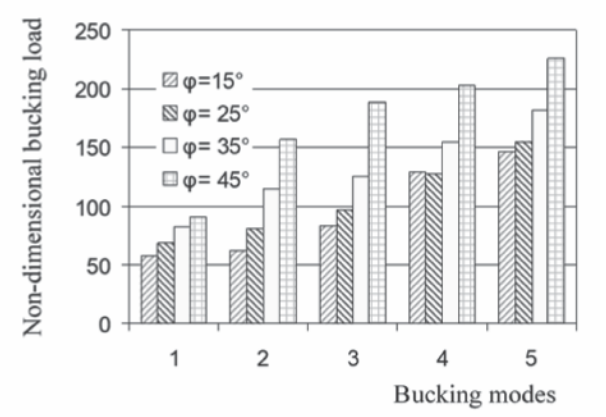


Figure 2. Effect of taper angles on buckling loads

The first five corresponding mode shapes with various taper angles of φ = 15°, 25°, 35°, 45° are shown in Figure 3-6.

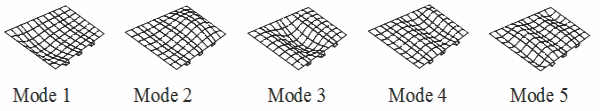


Figure 3. The first five mode shapes with taper angle of φ = 15°

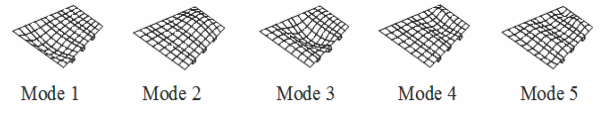


Figure 4. The first five mode shapes with taper angle of φ = 25°

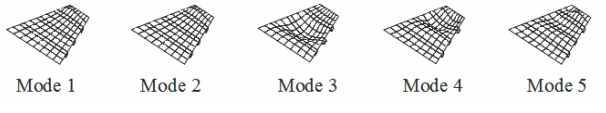


Figure 5. The first five mode shapes with taper angle of φ = 35°

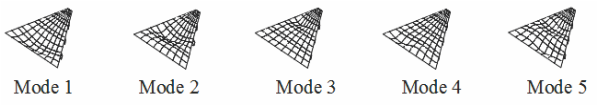


Figure 6. The first five mode shapes with taper angle of φ = 45°

The results shown in Figure 2 indicate that the non-dimensional buckling load of the laminated wing-shaped composite plates increases significantly when the taper angle φ increases from 15° to 45°, for all considered buckling modes (from mode 1 to mode 5). In particular, the plate with a taper angle of φ = 45° obtains the highest buckling loads in all modes, while the plate with φ = 15° gives the lowest values. This demonstrates that increasing the taper angle helps to improve the overall geometric stiffness of the plate, thereby enhancing its buckling resistance.

Moreover, the influence of the taper angle becomes more pronounced in higher buckling modes, as shown by the larger differences in buckling loads between different angles in mode 4 and mode 5. The nearly linear trend between buckling load and taper angle also suggests that the tapered geometry can be used as an effective design parameter to optimize the buckling performance of composite structures.

3.3. Effect of fiber orientations

To investigate the effect of fiber orientations on the buckling load, the composite plate with a taper angle of φ = 45° is considered for different fiber orientations of θ = 30°, 45°, 60°, 75° and laminated scheme of [0°/90°/0°/90°/0°] (denoted as [0°/90°/0°]s. Calculated buckling loads are compared in Figure 7.

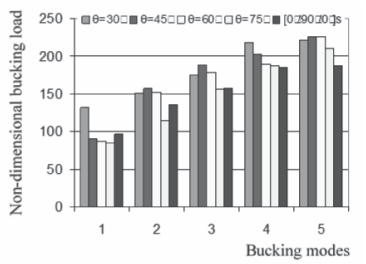


Figure 7. Effect of fiber orientations on buckling loads

The results presented in Figure 7 reveal that the buckling load is highly sensitive to the fiber orientation angle θ. Among the investigated cases, the fiber orientation of θ = 30° consistently provides the highest non-dimensional buckling loads, especially in buckling modes 3 and 5, indicating improved structural stability. In contrast, the fiber orientation of θ = 75° exhibits the lowest buckling capacities across all modes, reflecting reduced effectiveness in resisting buckling when fibers are aligned closer to the transverse direction. The symmetric laminated scheme [0°/90°/0°]s demonstrates relatively stable and moderate performance, offering balanced buckling resistance across different modes. Additionally, an increasing trend in buckling loads is observed with higher mode numbers for all fiber orientations, suggesting that the plate exhibits greater stiffness against higher-order buckling modes.

3.4. Effect of material properties

In this subsection, to investigate the effect of material properties on buckling loads, the laminated composite plate composed of three different materials (detailed in Tables 1, Tables 2, and Tables 3) with laminated scheme of [0°/90°/0°/90°/0°] and a taper angle of φ = 45° are considered. First five buckling loads calculated are compared in Figure 8.

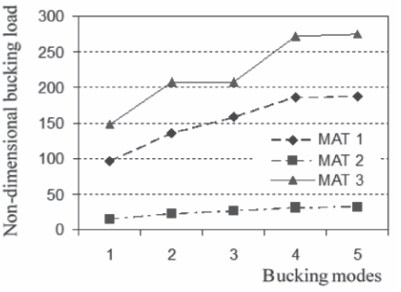


Figure 8. Effect of material properties on on buckling loads

The results presented in Figure 8 demonstrate a significant influence of material properties on the buckling performance of the composite plate. Among the three materials analyzed, MAT 3 consistently exhibits the highest non-dimensional buckling loads across all modes, indicating superior stiffness and stability characteristics. In contrast, MAT 2 yields the lowest buckling loads, suggesting it has the least effective mechanical properties for resisting buckling under the given configuration. MAT 1 shows intermediate performance, with buckling loads increasing steadily with the mode number. The results also reveal a clear trend of increasing buckling load with higher buckling modes for all materials, particularly notable in MAT 3, where a sharp increase is observed between modes 3 and 4. This indicates that the choice of material has a pronounced effect on both the magnitude and progression of buckling resistance across different modes.

4. CONCLUSIONS

This study has presented a numerical investigation on the linear buckling behavior of laminated composite wing-shaped plates reinforced with box-type stiffeners, based on a finite element formulation using Reissner–Mindlin plate theory. The effect of taper angle, fiber orientation, and material properties on the critical buckling load and corresponding buckling modes were systematically evaluated. From the numerical results, the following conclusions can be drawn:

- Taper angle significantly affects the structural stability of the composite plate. An increase in taper angle enhances the geometric stiffness, thereby increasing the critical buckling load across all mode numbers.

- Fiber orientation plays a crucial role in the buckling resistance. The fiber orientation of $\theta = 30°$ exhibited the highest buckling loads, while $\theta = 75°$ showed the lowest. The symmetric laminated scheme of [0°/90°/0°/90°/0°] provided balanced performance across different modes.

- Material properties strongly influence the buckling capacity. Among the three materials studied, MAT 3 demonstrated the highest stiffness and buckling resistance, while MAT 2 performed the weakest in terms of load-carrying capacity.

- For all considered parameters, higher-order buckling modes generally correspond to higher critical loads, emphasizing the role of structural stiffness and its sensitivity to design parameters.

The findings of this study provide useful insights into the design and optimization of lightweight composite wing structures, particularly in aerospace applications where stability under compressive loads is a key design requirement.❖

References:

[1]. W. Zhao, R. K. Kapania, "*Buckling analysis of unitized urvilinearly stiffened composite panels*". Composite Structures 135 (2016) 365-382.

[2]. Y. Xiong, G. Shi, F. Wang, D. Wang, "*Dynamic buckling analysis of stiffened panels under in-plane uniaxial impact considering plate/web interaction*". Ocean Engineering 279 (2023) 114462.

[3]. Z.Lijuan, Z. Yifeng, L. Qiushi, S. Zheng, "*Static and dynamic analysis of hemispherical convex-concave composite plate (HCCP) using variational asymptotic equivalent model*". Composite Structures 271 (2021) 114116.

[4]. S.A. Mohamed, N. Mohamed, M.A. Eltaher, "*Bending, buckling and linear vibration of bio-inspired composite plates*". Ocean Engineering 259 (2022) 111851.

[5]. Y. Wang, J. Fan, X. Shen, X. Liu, J. Zhang, N. Ren, "*Free vibration analysis of stiffened rectangular plate with cutouts using Nitsche based IGA method*". Thin-Walled Structures 181 (2022) 109975.

[6]. M. S. Pereira and M. V. Donadon, "*Modified consistent element-free Galerkin method applied to Reissner–Mindlin plates*". Thin-Walled Structures 212 (2025) 113185.

[7]. P. Bera, J. P. Varun, P. K. Mahato, "*Buckling analysis of isotropic and orthotropic square/ rectangular plate using CLPT and different HSDT models*". Materials Today: Proceedings 56 (2022) 237-244.

[8]. Z. Jing, Y. Liu, L. Duan, S. Wang, "*Three-dimensional buckling analysis of stiffened plates with complex geometries using energy element method*". International Journal of Solids and Structures 306 (2025) 113105.

[9]. Decolon, C (2002), "*Analysis of Composite Structures*". Hermes Penton Ltd (English language edition).

FREE VIBRATIONAL AND BUCKLING ANALYSIS OF C-SECTION LAMINATED COMPOSITE BEAM

PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG TỰ DO VÀ ỔN ĐỊNH CỦA DẦM COMPOSITE LỚP VỚI MẶT CẮT CHỮ C

Bui Van Binh*, Pham Hai Trinh
Electric Power University
*Email: binhbv@epu.edu.vn

ABSTRACT

Thin-walled composite beams with C-sections are widely used in aerospace, civil engineering, and marine structures due to the superior properties of laminated composite materials. Based on the first-order shear deformation plate theory and employing nine-noded rectangular isoparametric plate elements with five degrees of freedom per node, this study presents numerical results on the free vibration and buckling behavior of thin-walled composite beams with C-sections. The effects of fiber orientation and material properties on natural frequencies, buckling loads, and corresponding buckling mode shapes are investigated. This study provides a numerical database that supports structural design and analysis of lightweight composite beams, particularly in high-performance applications in the aerospace, automotive, and civil engineering industries.

Keywords: *C-sections; Composite beam; Free vibration; Linear buckling; Mode shapes.*

TÓM TẮT

Dầm composite thành mỏng với mặt cắt như hình chữ C được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực hàng không, xây dựng dân dụng và chế tạo tàu thuyền vì nhiều đặc tính ưu việt của vật liệu composite lớp. Dựa trên lý thuyết tấm biến dạng cắt bậc nhất và sử dụng phần tử tấm hình chữ nhật 9 nút với năm bậc tự do tại mỗi nút, nghiên cứu này trình bày một số kết quả số về đặc tính dao động tự do và ổn định uốn của dầm composite thành mỏng có tiết diện hình chữ C. Trong đó, ảnh hưởng của góc sợi composite và cơ tính vật liệu đến tần số dao động riêng, tải trọng tới hạn và các dạng mất ổn định tương ứng được xem xét. Nghiên cứu này đóng góp cơ sở dữ liệu số về tính toán thiết kế kết cấu cho các dầm composite nhẹ, đặc biệt trong các ứng dụng hiệu suất cao thuộc các ngành công nghiệp hàng không, ô tô và xây dựng dân dụng.

Từ khóa: *Mặt cắt chữ C; Dầm composite; Dao động tự do; Ổn định tuyến tính; Mode dao động.*

1. INTRODUCTION

Thin-walled composite beams with open C- or U-shaped cross-sections are widely employed in aerospace, civil engineering, and mechanical applications due to their high strength-to-weight ratio. However, the mechanical behavior of such beams is inherently complex, as it is influenced by the combined effects of bending, torsion, and local warping deformation of the cross-section. These effects significantly impact both the dynamic characteristics and the stability performance of the beams, particularly under varying boundary and loading conditions.

In recent decades, the analysis of free vibration and stability of thin-walled composite beams has attracted considerable attention in the research community. Although classical beam theories offer simplicity and computational efficiency, they generally fail to accurately capture the anisotropic behavior and interlaminar interactions typical of laminated composite materials, as well as the distortion and warping deformations characteristic of thin-walled open sections. To overcome these limitations, various advanced methods and theories have been developed, including the generalized beam theory, higher-order shear deformation models, and the finite element method (FEM), aiming to enhance the accuracy of dynamic and stability simulations.

Recent studies have emphasized the importance of accounting for shear deformation, torsional effects, and material inhomogeneity in the accurate prediction of natural frequencies and critical loads. For instance, Sheikh et al. [1] proposed a one-dimensional finite element model for multilayer thin-walled composite beams with both open and closed sections, incorporating laminate configuration and out-of-plane deformations, and validated the model through numerical examples. Dey and Talukdar [2] utilized FEM to investigate the free vibration of channel-section beams considering warping deformation and compared their results with experimental data.

Hoang et al. in [3] study focused on the optimization of free vibration and lateral buckling stability of channel-section composite beams, using design variables such as flange width, web height, and fiber orientation. A beam element with seven degrees of freedom per node was employed in conjunction with a micro-genetic algorithm. Dennis et al. [4] developed an 8-d.o.f beam element based on an extended Vlasov theory following Andrade's formulation to overcome limitations in modeling tapered C-section beams. Tan et al. [5] examined the lateral buckling behavior of thin-walled functionally graded beams with symmetric I- and channel-sections using Vlasov's hypothesis, accounting for warping deformation and material gradation, combined with FEM.

Linh et al. [6] proposed an FEM model for thin-walled functionally graded beams with open sections, where the material properties vary along the cross-sectional boundary. The model allows for determining natural frequencies and mode shapes, while also investigating the influence of material distribution functions and geometry. Liu et al. [7] introduced a special dynamic stiffness model for rib-stiffened plate structures with arbitrary boundary conditions and section configurations, employing a modified Fourier series and the Wittrick–Williams algorithm for vibration analysis.

☞

Xu et al. [8] focused on higher-order vibration modes of complex open-section thin-walled beams, which are highly sensitive to torsional and out-of-plane warping effects. Linh et al. [9] addressed the optimization of vibration and bending stability for FG beams with doubly symmetric I- and channel-sections, using a non-monotonic material distribution, a 14-d.o.f Vlasov-based beam element, and a differential evolution algorithm. Marzok and Waisman [10] employed the extended finite element method (XFEM) for buckling analysis of thin-walled beams, demonstrating that XFEM can yield accurate results with coarse meshes and reduced computational cost. Turkalj et al. [11] adopted the Timoshenko–Ehrenfest bending theory and a modified Vlasov torsion model with cubic Hermite interpolation to avoid shear locking in nonlinear stability analysis of multilayer composite beams.

In Vietnam, Binh and Trinh [12] developed a Matlab-based FEM program to study the effects of cutouts and boundary conditions on the natural frequencies and vibration modes of thin-walled box beams. Binh and Hien [13] used a 9-nodes, first-order shear deformation plate element (with 5-d.o.f per node) to analyze the impact of taper angle on the vibrational characteristics and transient deflection response of tapered composite thin-walled rectangular box beams.

In the present study, the free vibration and stability behavior of thin-walled composite beams with C- sections is investigated using a finite element model based on plate elements. Numerical results are presented to evaluate the effect of fiber orientation and laminated scheme on natural frequencies and buckling loads.

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

2.1. The displacement field

According to the Reissner-Mindlin plate theory [14], the displacements (u, v, w) are referred to those of the mid-plane (u_0, v_0, w_0) as:

$$\begin{aligned} u(x,y,z,t) &= u_0(x,y,t) + z\theta_x(x,y,t) \\ v(x,y,z,t) &= v_0(x,y,t) + z\theta_y(x,y,t) \\ w(x,y,z,t) &= w_0(x,y,t) \end{aligned} \quad (1)$$

Here, t is time, θ_x and θ_y are the total rotations, ϕ_x and ϕ_y are the constant average shear deformations about the y and x-axes, respectively.

The z-axis is normal to the xy-plane that coincides with the mid-plane of the laminate positive downward and clockwise with x and y.

2.2. Finite element formulations

In laminated plate theories [14], the membrane {N}, bending moment {M} and shear stress {Q} resultants can be obtained by integration of stresses over the laminate thickness. The stress resultants-strain relations can be expressed in the form:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{ij}] & [B_{ij}] & [0] \\ [B_{ij}] & [D_{ij}] & [0] \\ [0] & [0] & [F_{ij}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\kappa\} \\ \{\gamma^0\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Where:

$$\left([A_{ij}],[B_{ij}],[D_{ij}]\right) = \sum_{k=1}^{n} \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left([Q'_{ij}]_k\right)(1,z,z^2)dz$$

(i, j = 1, 2, 6) (3)

$$[F_{ij}] = \sum_{k=1}^{n} f \int_{h_{k-1}}^{h_k} \left([C'_{ij}]_k\right)dz; \quad f = 5/6;\ i,j = 4, 5 \quad (4)$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

n: Number of layers, h_{k-1}, h_k: The position of the top and bottom faces of the k^{th} layer.

$[Q'_{ij}]_k$ and $[C'_{ij}]_k$: Reduced stiffness matrices of the k^{th} layer (see [9]).

In the present work, nine-nodded isoparametric quadrilateral element with five degrees of freedom per nodes is used.

For free and forced vibration analysis, the damping effect is neglected; the governing equations are [14]:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{0\} \text{ or}$$

$$\left\{[M]-\omega^2[K]\right\}=\{0\} \quad (4)$$

And $$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=f(t) \quad (5)$$

The eigenvalue type of buckling equation can be expressed as in the following steps by dropping force terms and conceded to:

$$\left\{[K]+\lambda_{CR}[K_G]\right\}\left\{\Delta d\right\}=\{0\} \quad (6)$$

Where, $[K_G]$ is the geometric stiffness matrix; {Δd} is the displacement increment vector and λ_{CR} is the critical mechanical load at which the structure buckles; [M], [K] are the global mass matrix, stiffness matrix, respectively.

3. NUMERICAL RESULTS

3.1. The C-section laminated composite beam

Consider a C-section laminated composite beam is shown in Figure 1; the dimensions: OO_1 = L = 2(m), flange width: OB = 0.2(m), web depth: OA = 0.1 (m), each ply has a thickness of 0.25 (mm), laminated scheme $[\theta°/-\theta°]_{10S}$. The material parameters are set as follow: MAT1 (Graphite/Epoxy): E_1 (GPa) = 155; E_2, E_3 (GPa) = 8.07; $G_{12,\ 13}$ (GPa) = 4.55; G_{23} (GPa) = 3.9; $\upsilon_{12,13}$ = 0.22; υ_{23} = 0.22; ρ (kg/m^3) = 1558; MAT2 (Boron/Epoxy): E_1 (GPa) = 201; E_2, E_3 (GPa) = 21.7; $G_{12,\ 13}$ (GPa) = 5.4; G_{23} (GPa) = 3.69; $\upsilon_{12,13}$ = 0.17; υ_{23} = 0.035; ρ (kg/m^3) = 1724; MAT3(E-Glass/Epoxy): E_1 (GPa) = 41; E_2, E_3 (GPa) = 10.04; $G_{12,\ 13}$ (GPa) = 4.3; G_{23} (GPa) = 3.45; $\upsilon_{12,13}$ = 0.28; υ_{23} = 0.28; ρ (kg/m^3) = 1860.

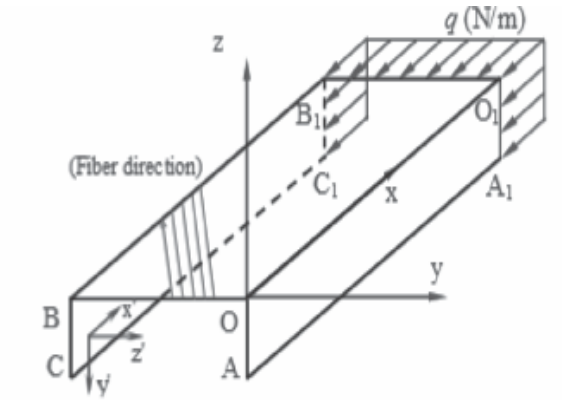


Figure 1. The C-section composite beam under uniform compression

Boundary conditions: At edges x = 0 are fixed and other edges are free.

3.2. Effect of fiber orientation on natural frequencies and buckling loads

In this subsection, to investigate the effect of fiber orientation on natural frequencies, the C-section beam made of MAT1 with laminate scheme $[\theta°/-\theta°]_{10S}$ are considered for different fiber orientation of θ = 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and $[0°/90°]_{10S}$. Figure 2 presents a comparison of the first five natural frequencies (ω_i) corresponding to different fiber orientations.

☞

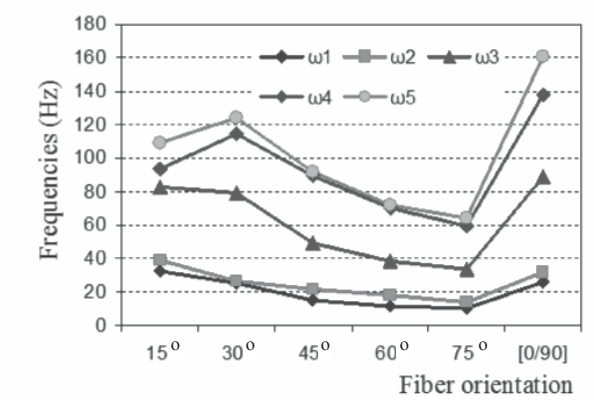


Figure 2. Effect of fiber orientation on natural frequencies

The first five buckling mode shapes of the beam with laminate scheme $[45°/-45°]_{10S}$ are shown in Figure 3.

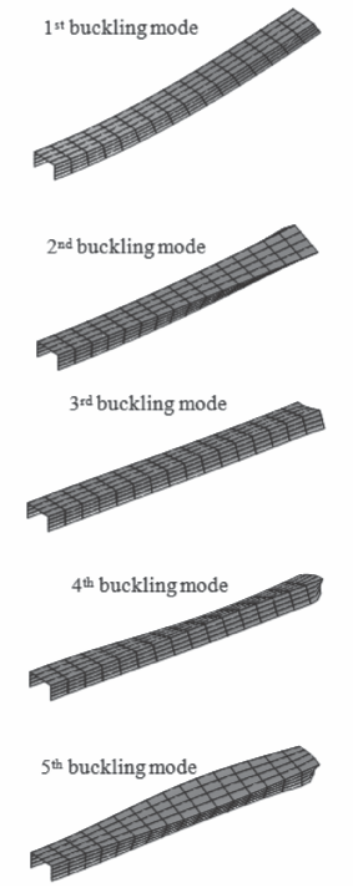


Figure 3. The first five buckling mode shapes (MAT1, $[45°/-45°]_{10S}$)

The results shown in Figure 2 indicate that the natural frequencies of C-section composite beams are significantly influenced by the fiber orientation. As the fiber angle increases from 15° to 45°, all of the first five natural frequencies decrease, reaching their minimum values at approximately 45°. This trend reflects the reduction in axial stiffness due to the off-axis fiber effect. However, when the fiber angle increases further to 75°, the frequencies tend to rise again, attributed to the enhanced contribution from transverse stiffness. The $[0°/90°]_{10S}$ configuration yields the highest frequencies, demonstrating a well-balanced stiffness in both longitudinal and transverse directions. These findings highlight the critical importance of selecting an appropriate fiber orientation in the design of composite beams.

Figure 3 illustrates the obtained mode shapes, clearly showing a combination of bending, torsion, and warping deformations-characteristic of thin-walled structures with open cross-sections. The first mode is dominated by global bending in the principal plane. In the second and third modes, torsional effects become increasingly evident, particularly in the form of local twisting of the flange and web. The fourth and fifth modes reveal a complex interaction between bending and torsion, accompanied by pronounced warping at the section corners. These modes underscore the influence of fiber-induced anisotropy, especially in $[45°/-45°]_{10S}$. The early appearance of torsional and warping modes is a consequence of asymmetric stiffness and uneven stress distribution resulting from the fiber orientation, reducing the torsional resistance of the structure. This suggests that in the $[45°/-45°]_{10S}$ configuration, longitudinal stiffness is diminished while shear and torsional effects become more prominent under compressive loading.

Figure 4 presents a comparison of the first five buckling loads corresponding to different fiber orientations.

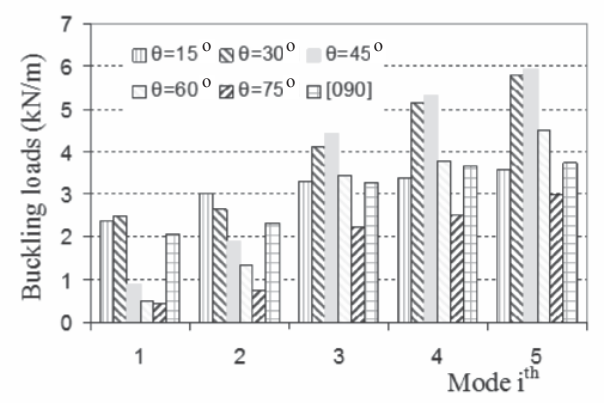


Figure 4. Effect of fiber orientation on buckling loads

Figure 4 illustrated that the critical buckling load reaches its maximum for the $[0°/90°]_{10S}$ configuration, where fibers are aligned parallel or perpendicular to the loading direction, thereby maximizing axial stiffness. In contrast, when the fiber orientation lies within 30° - 60°, particularly at 45°, the buckling load significantly decreases due to the pronounced reduction in axial stiffness caused by the diagonal fiber effect.

3.3. Effect of material properties on natural frequencies and buckling loads

To investigate the effect of material properties on the buckling load, the natural frequencies, the C-section beam made of MAT1, MAT2 and MAT3, with laminated scheme of $[45°/-45°]_{10S}$ are considered. The first five natural frequencies for various material properties are compared and illustrated in Figure 5.

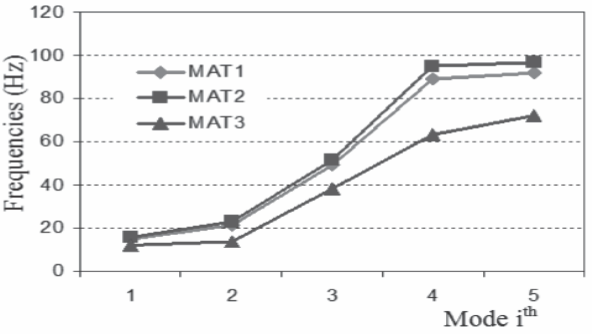


Figure 5. Effect of material properties on natural frequencies

Figure 5 shows that among the three materials studied, Boron/Epoxy (MAT2) exhibits the highest natural frequencies across all modes, followed by Graphite/Epoxy (MAT1) and E-Glass/Epoxy (MAT3). This outcome reflects differences in longitudinal modulus and stiffness-to-mass ratio. With a high E_1 modulus and relatively low density, Boron/Epoxy provides superior overall stiffness without a significant increase in weight, leading to enhanced dynamic performance. Conversely, E-Glass/Epoxy has a higher density but lower stiffness, resulting in reduced natural frequencies. Therefore, material selection should be carefully considered according to the specific dynamic performance requirements of the structure.

Figure 6 presents a comparison of the first five buckling loads corresponding to different material properties.

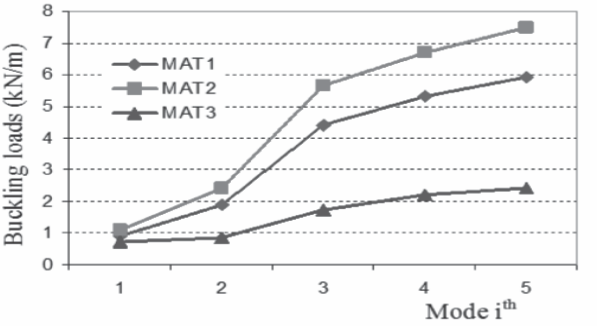


Figure 6. Effect of material properties on buckling loads ☞

Figure 6 illustrated that the critical buckling load is strongly affected by material properties. Boron/Epoxy again demonstrates superior performance, achieving the highest buckling loads across all modes due to its high longitudinal stiffness, which delays the onset of instability under compressive loads. In contrast, the E-Glass/Epoxy beam exhibits the lowest buckling loads, indicating its limitations in high-compression applications. These findings reaffirm the significant role of material characteristics, not only in terms of global stiffness but also in anisotropy and lamination structure, in enhancing the buckling resistance of composite beams.

4. CONCLUSIONS

This study presented a finite element analysis of the free vibration and linear buckling behavior of thin-walled composite C-section beams using a nine-node shell element based on the Reissner–Mindlin theory. The numerical results clearly demonstrate that fiber orientation has a substantial impact on both natural frequencies and critical buckling loads. For the specific beam configuration considered, the $[0°/90°]_{10S}$ fiber arrangement optimizes both vibrational and buckling performance. Boron/Epoxy, with its high modulus and favorable stiffness-to-weight ratio, offers superior performance in both domains. The nine-node plate element proved effective in capturing the combined effects of bending, torsion, and shear in thin-walled open-section beams. The numerical findings provide valuable insights for engineers involved in the design and optimization of high-performance composite beams.❖

References:

[1]. A. H. Sheikh, A. Asadi, O. T. Thomsen, "*Vibration of thin-walled laminated composite beams having open and closed sections*". Composite Structures 134 (2015) 209-215.

[2]. P. Dey and S. Talukdar, "*Influence of warping on modal parameters of thin-walled channel section steel beam*". Procedia Engineering 144 (2016) 52-59.

[3]. Hoang X. Nguyen, J. Lee, Thuc P. Vo, D. Lanc, "*Vibration and lateral buckling optimisation of thin-walled laminated composite channel-section beams*". Composite Structures 143 (2016) 84-92.

[4]. S. T. Dennis, K. W. Jones, "*Flexural-torsional vibration of a tapered C-section beam*". Journal of Sound and Vibration 393 (2017) 401-414.

[5]. N. T. Tan, P. T. Thang, J. Lee, "*Lateral buckling analysis of thin-walled functionally graded open-section beams*". Composite Structures 160 (2017) 952-963.

[6]. T.M. P. Linh, N.T. Tan, J. Lee, "*Free vibration of thin-walled open-section beams with functionally graded materials along the contour direction*". Thin-Walled Structures 159 (2021) 107146.

[7]. X. Liu, Y. Li, Y. Lin, J. R. Banerjee, "*Spectral dynamic stiffness theory for free vibration analysis of plate structures stiffened by beams with arbitrary cross-sections*". Thin-Walled Structures 160 (2021) 107391.

[8]. X. Xu, E. Carrera, R. Augello, E. Daneshkhah, H. Yang, "*Benchmarks for higher-order modes evaluation in the free vibration response of open thin-walled beams due to the cross-sectional deformations*". Thin-Walled Structures 166 (2021) 107965.

[9]. P.T.M. Linh, N.T. Tan, J. Kang, J. Lee, "*Vibration and buckling optimization of thin-walled functionally graded open-section beams*". Thin-Walled Structures 170 (2022) 108586.

[10]. A. Marzok, H. Waisman, "*FEM based method for buckling analysis of thin-walled beams*". Thin-Walled Structures 189 (2023) 110942.

[11]. D. Bani´c , G. Turkalj, D. Lanc, "*A geometrically nonlinear finite element formulation for buckling analysis of shear deformable angle-ply composite beam-type structures*". Computers and Structures 301 (2024) 107427.

[12]. B.V. Binh and P. H. Trinh, "*Vibration analyses of composite thin – wall box beam with cutouts*". Vietnam Mechanical Engineering Journal, Vol. 9 (2017), 109-114 (in Vietnamese).

[13]. B.V. Binh and L.T. Hien, "*Vibration Analyses of a Tapered Composite Thin-Wall Box Beam with Rectangular Section*". Applied Mechanics and Materials, Vol.889, Trans Tech Publications, Switzerland (2019),379-387. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.889.379.

[14]. C. Decolon, (2002), "*Analysis of Composite Structures"*. Hermes Penton Ltd. (English language edition).

DYNAMIC ANALYSIS OF STIFFENED SHALLOW SHELL ON NONLINEAR ELASTIC SUPPORTS SUBJECTED TO BLAST LOADING

PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC VỎ THOẢI CÓ GÂN GIA CƯỜNG TRÊN LIÊN KẾT ĐÀN HỒI PHI TUYẾN CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NỔ

Le Xuan Thuy
Department of Solid Mechanics, Le Quy Don Technical University
Email: thuylx@lqdtu.edu.vn

ABSTRACT

Covered structures (as roof tunnels) affected by short-term loads, like impulses or shock waves from an explosion, typically require solutions to dissipate energy and reduce the load on the structure. The most common solution involves using flexible pillows, which can be linear elastic supports, nonlinear elastic supports, viscoelastic supports, etc. The paper presents the problem of stiffened shallow shell on nonlinear elastic supports subjected to blast loading. Therefore, it addresses a specific case, evaluating the effectiveness of using nonlinear linkage model.

Keywords: *Blast loading; Impulse; Shell; Nonlinear elastic; Nonlinear restraints.*

TÓM TẮT

Các kết cấu dạng mái che (như mái che đường hầm) chịu tác động của tải trọng ngắn hạn, như xung lực hoặc sóng xung kích từ vụ nổ, thường yêu cầu các giải pháp để phân tán năng lượng và giảm tải trọng lên kết cấu. Giải pháp phổ biến nhất là sử dụng liên kết giá đỡ (gối đỡ), có thể là giá đỡ đàn hồi tuyến tính, giá đỡ đàn hồi phi tuyến, giá đỡ đàn nhớt, v.v. Bài báo trình bày lời giải cho bài toán tính kết cấu vỏ thoải có gân gia cường trên liên kết đàn hồi phi tuyến chịu tải trọng nổ. Bài báo giải quyết một trường hợp cụ thể, đánh giá hiệu quả của việc sử dụng mô hình liên kết phi tuyến trong tính toán.

Từ khóa: *Tải trọng nổ; Xung lực; Vỏ; Đàn hồi phi tuyến; Liên kết phi tuyến.*

1. INTRODUCTION

With outstanding features such as lightweight, and good coverage, the shell structures are widely used in many fields with many shapes. When the structure is required to withstand the impulse load, the solution of using the elastic restraints is often thought of. Research on the problem of shell structure affected by shock waves has received the attention of many scientists. Susler et al. [1] investigated the geometrically nonlinear dynamic behavior of tapered laminated composite plates supported and subjected to air blast loading. Cheng Zheng et al. [2] study the large deformation of reinforced plates under shock waves through experimental testing and numerical simulation. The results allow to evaluate the effects of material deformation rates and boundary conditions on the dynamic response of the plate. H. Türkmen [3] uses analytical methods to establish the governing equation of composite shell subjected to three-layer blast loading. Nguyen Duc Thang [4] focused on solving the problem, in which a single shock wave affected shallow cylindrical shells on linear and nonlinear elastic supports. However, the shell structures in these models did not have stiffeners. Calculation of the plate and shell structures on the elastic links bearing the effect of mechanical and heat load are presented in the studies of Nguyen Dinh Duc et al. [5, 6]. The stiffened shallow shells under the influence of multiple layers of shock waves were shown by Nguyen Thai Chung, Le Xuan Thuy [7].

This paper presents further development of the research direction regarding stiffened shallow shells on nonlinear elastic supports subjected to blast loading. It focuses on incorporating the nonlinear component of the bond into the oscillator differential equation and the solving algorithm. The issues related to shell structures on softening pillow systems or hardening support systems are also discussed.

2. DYNAMICS MODEL OF SHELL WITH FLEXIBLE PADS

The shell is supported by flexible pads with cross-sectional dimensions $b_e \times h_e$ and Young's modulus E_e at its four edges. The flexible edge supports of the shell can be modeled as translational springs (Fig. 2). The constitutive equation of the hardening system [8, 9] is typically expressed as:

$$F = k.u \quad (1)$$

$$k = k_0 + \alpha k_0 u^2 \quad (2)$$

Where F denotes constrained force, k denote stiffness constants, u denotes displacement, and α is a small parameter.

To describe the spring with the force-displacement curves characteristic outlined above in the ANSYS software, we utilize the COMBIN39 element [10]. COMBIN39 is a unidirectional element with a nonlinear generalized force-deflection capability that can be employed in any analysis. The element offers longitudinal or torsional functionality in 1-D, 2-D, or 3-D applications. The longitudinal option is a uniaxial tension-compression element featuring up to three degrees of freedom at each node: translations in the nodal x, y, and z directions. No bending or torsion is taken into account. The torsional option is a purely rotational element with three degrees of freedom at each node: rotations about the nodal x, y, and z-axes. No bending or axial loads are accounted for. The element possesses large displacement capability, allowing for two or

three degrees of freedom at each node. It has no mass or thermal capacitance.

To describe the shell and ribs in the model, the SHELL93 and BEAM188 elements are utilized. SHELL93 is particularly well-suited for modeling curved shells. The element features six degrees of freedom at each node: translations in the nodal x, y, and z directions, as well as rotations about the nodal x, y, and z-axes. The deformation shapes are quadratic in both in-plane directions. BEAM188 is based on Timoshenko beam theory, incorporating shear deformation effects. It has six degrees of freedom at each node.

3. THE EQUATION OF MOTION WITH AN ADDITIONAL LOAD VECTOR

To solve the nonlinear transient response of the shell supported by nonlinear elastic restraints, the nonlinear restoring forces of the restraints are treated as additional applied loads [8].

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{p(t)\}+\{N(u)\} \quad (3)$$

Where vectors {p(t)} and {u(t)} denote applied nodal loads and system displacements, respectively, being functions of time.

The vector {N} denotes the nonlinear forces supplied by nonlinear elastic restraints, depending on the displacements {u}, which can be treated as additional applied loads. The nonlinear equations are solved by using the load increments scheme in conjunction with Newton-Raphson iteration. A complete description of the numerical procedure used to solve the nonlinear problem is given in Figure 1.

For geometrically nonlinear problems, the system of equations needs to be solved multiple times to track the behavior of the deformed structure. Nonlinear variations can result from changes in shape or loading. The stiffness of the structures varies and must be taken into account by regenerating the stiffness matrix during a nonlinear analysis.

The element stiffness is:

$$[K]=\frac{\partial}{\partial u}\int_V [B]^T\{\sigma\}dV=[K]^m+[K]^d \quad (4)$$

Where $[K]^m$ and $[K]^d$ refer to the material and the differential stiffness, respectively.

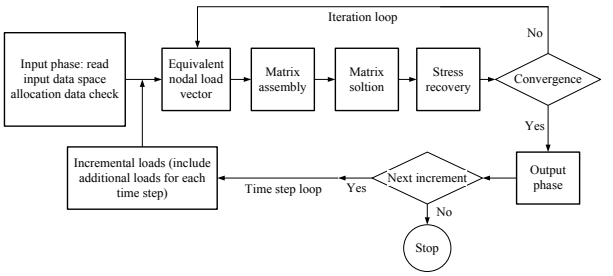


Figure 1. Diagram of nonlinear solution with additional loads.

4. NUMERICAL EXAMPLES

Consider a shallow cylindrical shell with a rectangular plan view. The dimensions of the plate L = 2.0 m, W = 1.0 m, curved radius R = 1.5 m and thickness t = 0.01 m. The shell includes stiffeners with a height of 0.02 m and a thickness of 0.01 m. There are 6 stiffeners in each direction. The material parameters for the shell and ribs are: Young's modulus E = 2.0 x 10^{11} N/m^2, Poisson's ratio ν = 0.31, and density ρ = 7800 kg/m^3. The applied load is due to a shock wave characterized by the load law $p(t) = p_{max}F(t)$, where p_{max} = 3 x 10^4 N/m^2, $F(t)=\begin{cases}1-\frac{t}{\tau}: & 0 \le t \le \tau \\ 0 : & t>\tau\end{cases}$, the load time

τ = 0.025 s, and the calculation time τ_t = 0.08 s. The four sides of the shell are supported by restraints. These geometric and load parameters are shared by three examples in this study.

In this example, the force-displacement relation of restraints is calculated according to the formula $F = k_0u + \alpha k_0u^3$. Evaluating the influence of the bearing and the linear and nonlinear restraints model, the author addresses the problem with the following cases:

Case1: k_0 = 1.0 x 10^4 N/m, α = 0 (linear model).

Case2: k_0 = 1.0 x 10^4 N/m, α = 1.8 (nonlinear model).

The results of displacements and stresses at point A, spring compression at point B (Fig. 2):

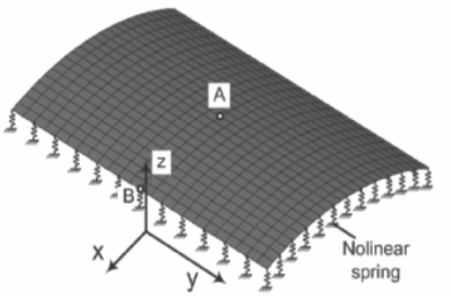


Figure 2. Model of shell supported by flexible pads at 4 edges

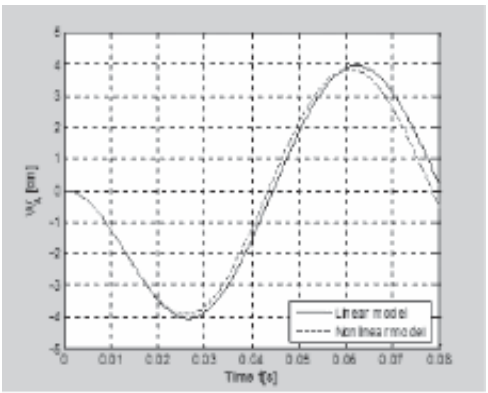


Figure 3. Vertical displacement WA over time

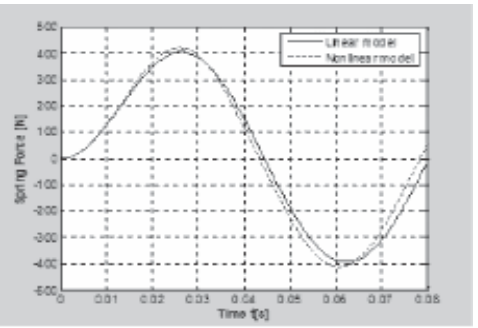


Figure 4. Spring force over time

Table 1. The extreme value is at the point A, B

Method	W_A^{max} **[cm]**	$\sigma^A_{x\,max}$ **[N/m^2]**	$\sigma^A_{y\,max}$ **[N/m^2]**	F^B_{spring} **[N]**
Linear model	4.047	5.779 x 10^6	8.780 x 10^6	404.694
Nonlinear model	3.938	5.990 x 10^6	9.120 x 10^6	421.672

• Comment:

In the first stage (t < 0.02s), the results in both cases are quite similar (the graph is almost identical). This may be due to the deformation of the springs being too small for the nonlinearity to have much impact. The difference becomes evident in the later stage when the deformation of the spring is substantial. The extreme value of the displacement at A decreases, while the stress at A and the compression of the spring increase. This is understandable when the nonlinear restraints are utilized as a hardening system.

5. CONCLUSIONS

In this paper, the simulation program of stiffened shallow shells supported by nonlinear elastic supports subjected to blast loading was

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

developed, thereby solving specific examples with various support patterns. With the program established, it is possible to perform calculations for different types of nonlinear elastic restraint systems when the force-displacement relation diagram is known.

Compared to the linear elastic support model, the results obtained using the nonlinear elastic pillow model are more noticeable when the spring displacement is sufficiently large. The use of a softening support system that is preferable for reducing damage from pulse load, rather than using a hardening support system, is also presented.❖

References:

[1]. S. Susler, H. S. Turkmen, and Z. Kazanci, "*The nonlinear dynamic behavior of tapered laminated plates subjected to blast loading*". Shock and Vibration, vol. 19, no. 6, pp. 1235–1255, (2012).

[2]. Cheng Zheng, Xiang-shao Kong, Wei-guo Wu, Fang Liu, "*The elastic-plastic dynamic response of stiffened plates under confined blast load*", International Journal of Impact Engineering, 95 (2016), pp:141-153.

[3]. H. S. Türkmen, "*Structural response of cylindrically curved laminated composite shells subjected to blast loading*". Original Article (1999) 51, pp.175-180.

[4]. Nguyễn Đức Thắng (2007), "*Nghiên cứu phản ứng động của vỏ thoải trên các liên kết đàn hồi chịu tác dụng của sóng xung kích*". Luận án tiến sĩ, Học viện Kỹ thuật quân sự.

[5]. Nguyen Dinh Duc, Pham Hong Cong, Vu Dinh Quang, "*Nonlinear dynamic and vibration analysis of piezoelectric eccentrically stiffened FGM plates in thermal environment*". International Journal of Mechanical Sciences, 115-116 (2016), pp.711-722.

[6]. Nguyen Dinh Duc, Ngo Duc Tuan, Phuong Tran, Pham Hong Cong, Pham Dinh Nguyen (2016), "*Nonlinear stability of eccentrically stiffened S-FGM elliptical cylindrical shells in thermal environment*". Thin-Walled Structures, 108 (2016), pp.280-290.

[7]. Nguyen Thai Chung, Le Xuan Thuy, "*Effect of Some Factors on the Dynamic Response of Reinforced Cylindrical Shell with a Hole on Elastic Supports Subjected to Blast Loading*". International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS), Vol-4, Issue-6, 2016, pp.306-313.

[8]. A. Naghsh and M. Azhari, "*Non-linear free vibration analysis of point supported laminated composite skew plates*". International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 76, pp. 64-76, 2015.

[9]. P. Malekzadeh, "*Differential quadrature large amplitude free vibration analysis of laminated skew plates based on FSDT*". Composite Structures, vol. 83, no. 2, pp. 189-200, 2008.

[10]. Release 11.0, Documentation for ANSYS.

VIBRATION ANALYSIS OF A ROTOR SYSTEM SUPPORTED BY NONLINEAR HYDRODYNAMIC BEARINGS

PHÂN TÍCH DAO ĐỘNG PHI TUYẾN CỦA HỆ ROTOR - Ổ TRỤC THỦY LỰC

Van-Thanh Ngo

Faculty of Mechanical-Automotive and Civil Engineering, Electric Power University

Email: thanhnv@epu.edu.vn

ABSTRACT

In practice, linear analysis is often employed to calculate and predict physical phenomena during the vibration of rotor – bearing systems. However, in certain cases, nonlinear analysis is necessary to ensure the required level of accuracy. This paper conducts an analysis and comparison of a rotor system mounted on hydrodynamic bearings under both linear and nonlinear conditions. The nonlinear bearing force is modeled based on short bearing theory, incorporating the effects of oil film viscosity and bearing clearance. The results emphasize the critical importance of accounting for bearing force nonlinearity in accurately predicting the rotor's dynamic response.

Keywords: *Nonlinear analysis; Hydrodynamic bearings; Bearing force; Rotor dynamic.*

TÓM TẮT

Trong thực tế, phân tích tuyến tính thường được sử dụng để tính toán, dự đoán các hiện tượng vật lí trong quá trình dao động của hệ rotor ổ trục. Tuy nhiên, trong một số trường hợp cần sử dụng bài toán phi tuyến để phân tích nhằm đảm bảo độ chính xác cần thiết. Bài báo này tiến hành phân tích và so sánh hệ rotor lắp đặt trên ổ trục thủy lực trong hai trường hợp tuyến tính và phi tuyến. Lực từ ổ trục phi tuyến được xây dựng dựa trên lý thuyết ổ ngắn, có xét đến độ nhớt của màng dầu và khe hở ổ. Kết quả nhấn mạnh vai trò quan trọng của việc xét đến tính phi tuyến của lực ổ trục trong dự đoán chính xác đáp ứng động học của rotor.

Từ khóa: *Phân tích phi tuyến; Ổ trục thủy lực; Lực ổ trục; Động lực học rotor.*

1. INTRODUCTION

Rotor-bearing systems are fundamental components in a wide range of mechanical equipment, including turbines, compressors, generators, and high-speed machinery. Accurate prediction of their dynamic behavior is critical to ensure operational stability, safety, and efficiency. Traditional linear models of rotor dynamics have provided substantial insight; however, nonlinear effects arising from hydrodynamic bearings, material properties, and large amplitude vibrations can significantly alter system response, especially at high rotational speeds [1, 2].

Among these nonlinear sources, hydrodynamic journal bearings play a pivotal role due to the complex fluid-structure interactions between the rotating shaft and the surrounding oil film. The nonlinearity stems from the pressure distribution in the thin lubricant film, which depends nonlinearly on shaft eccentricity and velocity. This leads to phenomena such as sub-synchronous vibrations, bifurcations, and even chaotic motion under certain conditions [3, 4]. Consequently, accurately modeling and analyzing these nonlinearities are essential for modern rotor dynamics studies.

Recent advances in computational techniques and finite element modeling have enabled detailed investigations into nonlinear rotor-bearing systems [5, 6]. Particularly, the use of Timoshenko beam elements allows for the inclusion of shear deformation and rotary inertia effects, which are crucial for short and thick shafts. Moreover, the integration of nonlinear bearing forces into time-domain simulations has provided deeper understanding of transient responses and stability boundaries under various operational conditions [7].

Previous research efforts have highlighted that nonlinear oil-film forces can cause significant mode splitting, amplitude-dependent natural frequencies, and reduction in critical speeds [8]. Furthermore, experimental studies and numerical simulations have demonstrated the importance of considering bearing-induced damping and stiffness variations, which directly affect rotor stability margins [9, 10].

In this study, a detailed nonlinear dynamic analysis of a rotor system supported by hydrodynamic bearings is conducted. The shaft is modeled using six Timoshenko beam elements, while the bearings are represented with nonlinear force-displacement and force-velocity relationships based on short-bearing theory. The system's response is investigated at stationary (0 rpm) and operational (4,000 rpm) conditions. Modal analysis is performed to determine the natural frequencies and mode shapes, and time-domain simulations are carried out to capture nonlinear dynamic phenomena. This work aims to provide further insight into the complex dynamic behavior of rotors supported by nonlinear fluid film bearings, offering valuable guidance for the design and operation of rotating machinery.

2. SYSTEM CONFIGURATION

2.1. Geometrical and Material Properties

The rotor system comprises a steel shaft with two disks and is supported by hydrodynamic journal bearings as Figure 1. A 1.5m long shaft, has a diameter of 0.05m discretized into six Timoshenko beam elements, allowing for the inclusion of shear deformation and rotary inertia effects. The disks are keyed to the shaft at 0.4 and 1.2m from one end. The left disk is ☞

0.08m thick with a diameter of 0.3 m; the right disk is 0.07m thick with a diameter of 0.35m. Each node possesses four degrees of freedom: two translational and two rotational. Disks are modeled as lumped masses with appropriate inertias at their respective locations. For both the shaft and the disk, material are steel with ρ = 7 180 kg/m^3; E = 2.10^{11} GN/m^2 and G = 81.2 GN/m^2.

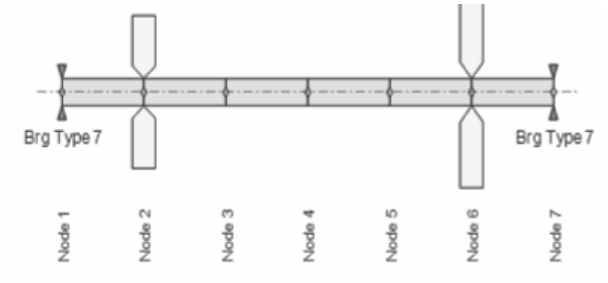


Figure 1. FEM mesh of the shaft

2.2. Bearings Modeling

A nonlinear-bearing model for a short, oil-film journal bearing as shown in Figure 2. The nonlinear relationship between bearing forces and journal displacement displacements u and v as:

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} = \eta\Omega L \left(\frac{D}{2c}\right)^2 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \begin{Bmatrix} \hat{f}_x \\ \hat{f}_y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \hat{f}_x \\ \hat{f}_y \end{Bmatrix} = -\frac{c\sqrt{(u\Omega-2\dot{v})^2+(v\Omega+2\dot{u})^2}}{\Omega(c^2-u^2-v^2)} \begin{Bmatrix} 3V\left(\frac{u}{c}\right) - G\sin\alpha - 2S\cos\alpha \\ V\left(\frac{v}{c}\right) + G\cos\alpha - 2S\sin\alpha \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Where u, v are the displacements of the rotor in the x, y directions, respectively; η is the oil viscosity; Ω is the speed of rotation of shaft; L, D, c are the bearing length, diameter, and radial clearance, respectively.

Thus, for the rotor - bearing system supported by a nonlinear bearing, equation of motion is:

$$M\ddot{q} + \Omega G\dot{q} + Kq = Q_b(q,\dot{q},t) + Q_{ub}(\Omega t) - Q_g \quad (3)$$

Where Q_b is a vector of bearing forces including the damping terms, Q_b is a vector of out-of-balance forces, and Q_g is a vector of gravitational forces. In equation (3):

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{v\Omega+2\dot{u}}{u\Omega-2\dot{v}}\right) - \frac{\pi}{2}\,\mathrm{sign}\left(\frac{v\Omega+2\dot{u}}{u\Omega-2\dot{v}}\right) - \frac{\pi}{2}\,\mathrm{sign}(v\Omega+2\dot{u}) \quad (4)$$

$$G(u,v,\alpha) = \frac{2c}{\sqrt{c^2-u^2-v^2}}\left\{\frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\left(\frac{v\cos\alpha-u\sin\alpha}{\sqrt{c^2-u^2-v^2}}\right)\right\} \quad (5)$$

$$V(u,v,\alpha) = \frac{2c^2+c(v\cos\alpha-u\sin\alpha)G}{c^2-u^2-v^2} \quad (6)$$

$$S(u,v,\alpha) = \frac{c(u\cos\alpha+v\sin\alpha)}{c^2-(u\cos\alpha+v\sin\alpha)^2} \quad (7)$$

In this work, the parameters of the bearing are: L = 40 mm, D = 80 mm, c = 60 μm, η = 0,03 Pa.s.

3. RESULTS AND DISCUSTION

3.1. Comparison response of linear and nonlinear bearing

Figure 3 illustrates in the eccentricity between the rotor center and the bearing center with respect to rotor speed Ω. As the speed increases, the eccentricity decreases, leading to a change in the bearing force acting on the rotor. Figure 4 shows the orbits of the rotor center at Bearing 1 corresponding to the first six vibration modes. The cross denotes the start and the diamon denotes the end of the orbit. It can be observed that as the rotor speed increases, the influence of the hydrodynamic bearing force causes the rotor to become asymmetric, with the orbit transforming into an elliptical shape.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

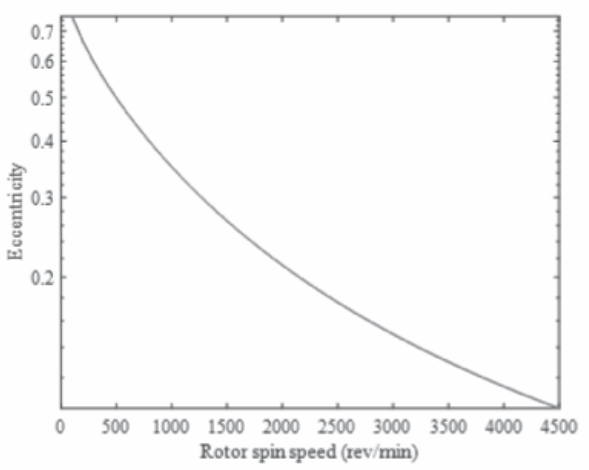


Figure 3. Eccentricity between the rotor center and the bearing center

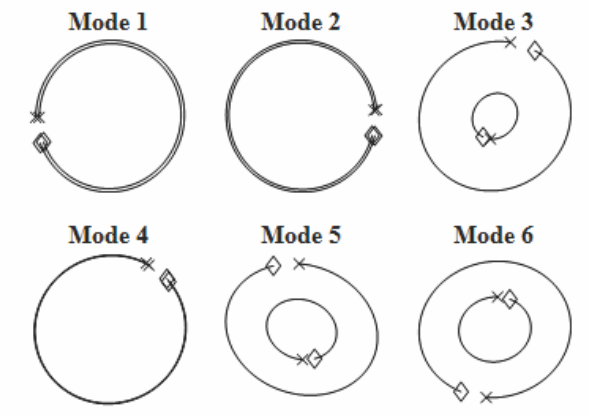


Figure 4. The axel view of the mode shape at bearing 1.

The Campbell diagram shows how rotor natural frequencies and excitation lines vary with rotor speed as shown in Figure 5. As speed increases, the forward whirl mode rises due to gyroscopic effects, while the backward mode drops. The 1X excitation line intersects the forward mode near 4000 rpm, indicating a potential resonance zone where oil whip may occur. Below this speed, the 0.5X line aligns with the forward mode, signaling the risk of oil whirl. These intersections highlight critical speeds where subsynchronous instabilities can arise. The second mode remains above all excitation lines, suggesting it's less likely to be excited. Overall, the diagram helps identify unsafe operating zones and the need for nonlinear modeling.

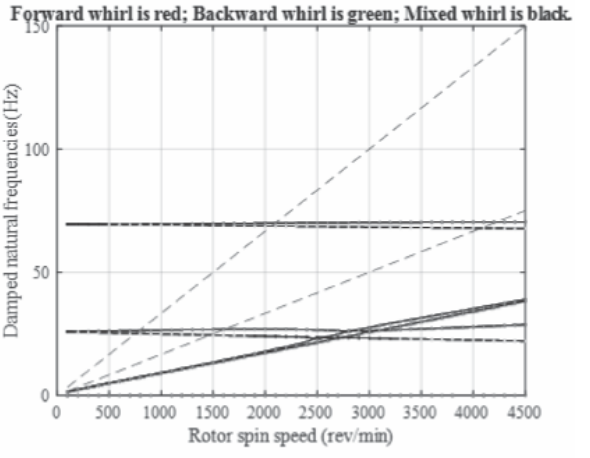


Figure 5. Campbel diagram

Time-domain simulations revealed critical differences between the linear and nonlinear bearing models shown in Figure 6. The linear model, the rotor response diverged rapidly at 4000 rpm, indicating instability. In contrast, the nonlinear bearing model stabilized into a limit-cycle oscillation. The vibration amplitude remained bounded, and a clear subsynchronous component emerged, corresponding to oil whirl behavior.

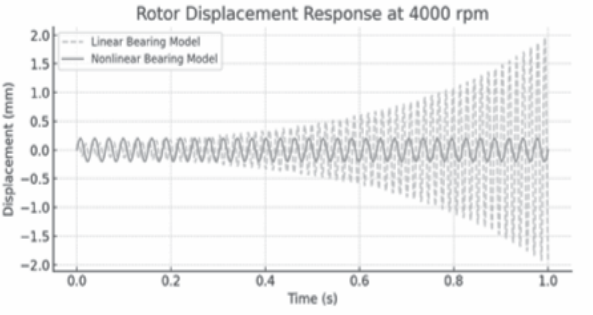


Figure 6. Rotor displacement response comparing linear and nonlinear bearing models

3.2. Oil Whirl and Oil Whip phenomena

The rotor orbits in the bearing clearance confirm the onset of oil whirl and whip phenomena as shown in Figure 7. At moderate speeds (< 4000 rpm), the rotor describes circular orbits at approximately 0.5X the rotation speed. This is a signature of whirl induced by cross-coupled stiffness of the hydrodynamic film. At or above 4000 rpm, the orbit pattern locks itnto the system's natural frequency (~22 Hz), and the whirl frequency becomes speed-independent. This reflects oil whip – a more severe instability where vibration can persist even as speed increases.

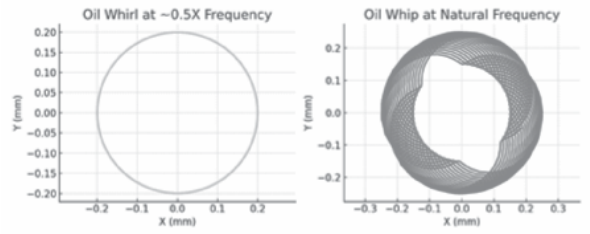


Figure 7. Orbit plots showing oil whirl and oil whip phenomena

A waterfall plot of frequency versus rotor speed highlights the transition from oil whirl to oil whip as shown in Figure 8. As speed increases: The 1X peak (synchronous) shifts proportionally with rotor speed. The 0.5X peak (subsynchronous) dominates at lower speeds and begins to fade near 4000 rpm. A flat, constant-frequency ridge at ~22 Hz emerges post-4000 rpm, confirming oil whip as the dominant vibration mode.

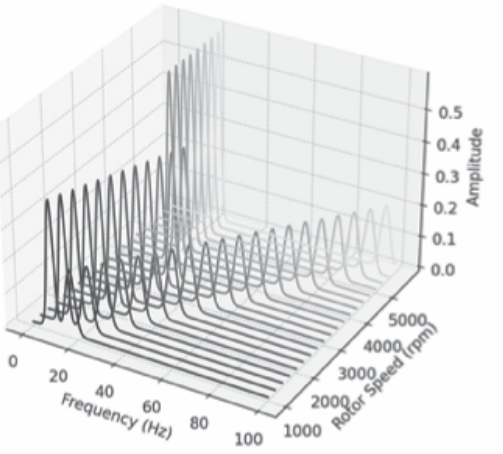


Figure 8. Waterfall plot at bearing 1.

A convenient method to determine stability is the root locus diagram, as shown in Figure 9. The system becomes unstable if any of the eigenvalues cross the imaginary axis and the real part becomes positive. It can be seen that, starting from 4,000 rpm, the rotor becomes unstable due to oil whip.

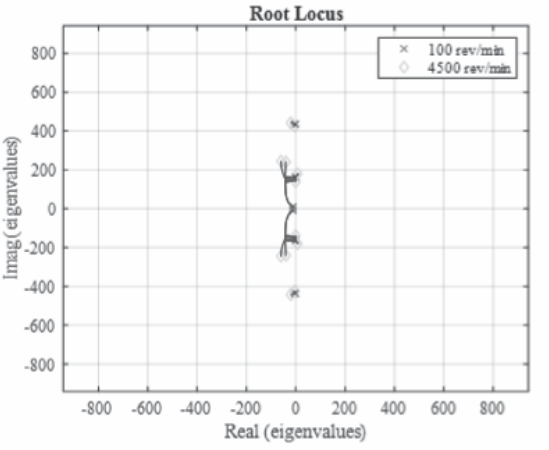


Figure 9. Root locus diagram

4. CONCLUSIONS

This study investigated the nonlinear dynamic behavior of a rotor system supported by hydrodynamic bearings. Finite element simulations revealed that gyroscopic effects

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

induce mode splitting, while nonlinear bearing forces give rise to subsynchronous vibrations. Oil whirl was observed below 4000 rpm, with a transition to oil whip occurring near the first natural frequency. The nonlinear model predicted bounded limit-cycle behavior, unlike the divergent response of linear models. Orbit shapes and waterfall spectra confirmed the presence of oil-film-induced instabilities. These results highlight the need for nonlinear modeling to ensure accurate prediction and safe operation of high-speed rotating machinery.❖

References:

[1]. Ivanov, I. I., Belousov, V. V., Myasnikov, V. Y., Serebriakov, N. N., & Shadrin, D. V. (2020), "*Study of rotor dynamics considering a fluid film bearing*". In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 747, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

[2]. Khamari, D. S., Kumar, J., & Behera, S. K. (2023), "*Rotordynamic analysis of a complex high-speed rotor*". Materials Today: Proceedings, 90, 299-304.

[3]. Yu, X., Shao, M., Yang, X., Lin, Y., Lan, Z., Li, L., ... & Jiang, H. (2025), "*Advances in the investigation of thermal characteristics of hydrostatic bearing spindle: an overview*". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1-33.

[4]. Smolík, L., Byrtus, M., Dyk, Š., & Hajžman, M. (2018), "*Dynamic behaviour of rotors supported by fluid-film bearings operated close to fluid-induced instability*". In MATEC Web of Conferences (Vol. 148, p. 04003). EDP Sciences.

[5]. Friswell, M. I. (2010), "*Dynamics of rotating machines*". Cambridge University Press.

[6]. Lee, G. Y., Park, M., & Ahn, K. (2025), "*Nonlinear vibration analysis of rotor systems with hydrodynamic journal bearings using harmonic balance method*". International Journal of Non-Linear Mechanics, 170, 104992.

[7]. Sun, W., Yan, Z., Tan, T., Zhao, D., & Luo, X. (2018), "*Nonlinear characterization of the rotor-bearing system with the oil-film and unbalance forces considering the effect of the oil-film temperature*". Nonlinear Dynamics, 92, 1119-1145.

[8]. Xia, Z., Qiao, G., Zheng, T., & Zhang, W. (2009), "*Nonlinear modeling and dynamic analysis of the rotor-bearing system*". Nonlinear Dynamics, 57, 559-577.

[9]. Jianping, J., Guang, M., Yi, S., & SongBo, X. (2004), "*On the non-linear dynamic behavior of a rotor – bearing system*". Journal of Sound and Vibration, 274(3-5), 1031-1044.

[10]. Zhao, Y., Zhu, Y. P., Lin, J., Han, Q., & Liu, Y. (2022), "*Analysis of nonlinear vibrations and health assessment of a bearing-rotor with rub-impact based on a data-driven approach*". Journal of Sound and Vibration, 534, 117068.

SURFACE ROUGHNESS MODELING AND PARAMETER INFLUENCE IN NANO-MQL MILLING PROCESS

MÔ HÌNH HÓA ĐỘ NHÁM BỀ MẶT VÀ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ TRONG QUÁ TRÌNH PHAY SỬ DỤNG NANO-MQL

Tran Quoc Hung[1], Hoang Van Got[2], Do The Vinh[3], Vu Ngoc Pi[3], Hoang Anh Toan[3,*]
[1]Hanoi University of Industry, Hanoi city, Vietnam
[2]National Research Institute of Mechanical Engineering, Hanoi city, Vietnam
[3]Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen city, Vietnam
**Corresponding author: hoanganhtoan@tnut.edu.vn*

ABSTRACT

This study investigates the effect of cutting parameters and nanoparticle size on surface roughness (Ra) in CNC milling under nano-minimum quantity lubrication (Nano-MQL) conditions. A series of experiments were conducted using a factorial design to evaluate the individual influence of cutting speed, feed per tooth, depth of cut, and average nanoparticle diameter. Main effects plots and regression modeling were employed to identify the most influential parameters. The results indicate that feed per tooth is the dominant factor affecting surface roughness, while nanoparticle size also contributes to improving surface finish. The developed regression model demonstrates good predictive capability and provides valuable insights for selecting optimal cutting conditions in sustainable machining.

Keywords: *Surface roughness; CNC milling; Nano-MQL; Main effects plot; Regression modeling; Cutting parameters.*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng của các thông số cắt và kích thước hạt nano đến độ nhám bề mặt (Ra) trong quá trình phay CNC sử dụng phương pháp bôi trơn tối thiểu có pha bột nano (Nano-MQL). Một loạt thí nghiệm được thực hiện theo thiết kế thừa số để đánh giá ảnh hưởng riêng lẻ của tốc độ cắt, lượng chạy dao trên mỗi răng, chiều sâu cắt và đường kính trung bình của hạt nano. Biểu đồ hiệu ứng chính và mô hình hồi quy được sử dụng để xác định các thông số có ảnh hưởng lớn nhất. Kết quả cho thấy lượng chạy dao trên mỗi răng là yếu tố chi phối chính đến độ nhám bề mặt, trong khi kích thước hạt nano cũng góp phần cải thiện chất lượng bề mặt. Mô hình hồi quy xây dựng cho thấy khả năng dự đoán tốt và cung cấp thông tin hữu ích cho việc lựa chọn chế độ cắt tối ưu trong gia công bền vững.

Từ khóa: *Độ nhám bề mặt; Phay CNC; Nano-MQL; Biểu đồ hiệu ứng chính; Mô hình hồi quy; Thông số cắt.*

1. INTRODUCTION

Surface roughness (Ra) is one of the most critical indicators of surface quality in precision milling operations, particularly in the context of hard-to-machine materials. Numerous researchers have investigated the relationship between cutting parameters and surface integrity to enhance performance and sustainability. Gutnichenko et al. [1] analyzed tool damage and coating failure during hard milling of Vanadis 4E, highlighting how surface degradation is linked to coating delamination under TiAlN-coated PcBN tools. Similarly, Hassanpour et al. [2] demonstrated that ball nose flank wear significantly deteriorates the surface quality of AISI 4340 steel even under MQL conditions.

Beyond tool wear effects, Kaltenbrunner et al. [3] conducted combined experimental and numerical analyses to identify critical load conditions in titanium milling, which directly affect tool deflection and surface finish. Vovk et al. [4] and Zhang et al. [5] employed numerical and FEM-based techniques to investigate material behavior and cutting temperature, respectively-both factors known to correlate with Ra evolution.

Energy and surface integrity are inseparable in sustainable machining. Liu et al. [8] and Liu et al. [14] studied energy consumption in hard milling and found a strong connection between process efficiency, tool wear, and surface roughness, thus emphasizing the need for process optimization. In parallel, researchers have explored coating technologies to maintain surface finish over tool life. Beake et al. [10] and Teppernegg et al. [15], [16] reported how PVD coatings and residual stress accumulation impact Ra throughout the tool lifespan.

As surface roughness is not only influenced by tool materials but also by lubrication, several studies investigated the use of MQL and nano-enhanced cooling/lubrication methods. Hassanpour et al. [11] and An et al. [12] demonstrated that MQL substantially reduces white layer thickness and improves Ra, particularly with appropriate tool coatings. Denkena et al. [13] also showed that optimizing cutting edge geometry improves surface quality and wear resistance.

Recent work has emphasized hybrid techniques. Bian et al. [17] explored meso-scale hard milling with diamond-coated tools on ceramics, achieving improved Ra through precise control of forces. Jayakumar and Rahman [18] found that optimizing feed rate and cutting speed enhanced Ra when milling AA7075. Fuzzy logic and regression methods were applied by Tamilarasan et al. [19] for surface roughness prediction in hard milling. Meanwhile, Jenarthanan and Neeli [20] and Khare et al. [21] focused on force and Ra optimization through cutting speed variation and grey relational analysis (GRA). Particularly relevant to this study is the application of nanoparticles in MQL to reduce Ra. Nguyen and Do [23] introduce SiO_2 nanoparticles into MQL systems during hard milling of SKD11 steel and reported significant improvement in Ra and tool life. This aligns with other GFRP milling studies such as those by MP et al. [22], which combined GRA with experimental optimization techniques.

Despite these advancements, few studies have systematically modeled and quantified the influence of cutting parameters and nanoparticle size on Ra under Nano-MQL conditions. Moreover, the lack of integrated analysis combining both regression modeling ☞

and main effects plots motivates the present work. Therefore, this study aims to investigate and model the surface roughness in CNC milling using Nano-MQL, analyzing the effects of cutting speed, feed per tooth, depth of cut, and nanoparticle size. A combination of experimental data, main effects analysis, and regression modeling is used to identify dominant factors and guide process optimization for improved surface integrity in sustainable machining.

2. EXPERIMENTAL WORK

2.1. Experimental Design

This study employed a Box–Behnken Design (BBD) to systematically investigate the effects of key machining parameters on surface roughness (Ra) during CNC milling under nano-minimum quantity lubrication (Nano-MQL) conditions. The BBD approach was selected due to its efficiency in requiring fewer runs than a full factorial design while still allowing second-order model development.

The study considered four independent variables: cutting speed (v_c), feed per tooth (f_z), depth of cut (a_p), and average nanoparticle size (D_{avg}). Each factor was tested at three levels, as listed in Table 1.

Table 1. Input factors and their levels

Factor	Symbol	Unit	Levels
Cutting speed	v_c	m/min	100, 125, 150
Feed per tooth	f_z	mm/tooth	0.04, 0.06, 0.08
Depth of cut	a_p	mm	0.10, 0.15, 0.20
Nanoparticle size	D_{avg}	nm	20, 50, 100

A total of 45 experimental runs were generated using the Box–Behnken matrix. The detailed experimental plan and corresponding responses for surface roughness (Ra) are presented in Table 2. The experimental matrix was randomized to minimize the effect of uncontrolled variables.

Table 2. Experimental plan and output results

Trial.	v_c (m/ min.)	f_z (mm/ tooth)	a_p (mm)	D_{avg} (nm)	Ra
1	150	0.06	0.2	20	0.32
2	150	0.04	0.15	100	0.215
3	125	0.06	0.15	100	0.28
4	150	0.06	0.15	50	0.27
5	150	0.08	0.2	50	0.38
6	100	0.06	0.25	20	0.43
7	125	0.06	0.2	100	0.31
8	100	0.04	0.15	100	0.3
9	150	0.06	0.15	100	0.26
10	150	0.06	0.25	100	0.31
11	125	0.08	0.15	50	0.37
12	100	0.06	0.2	20	0.36
13	150	0.04	0.15	50	0.23
14	125	0.06	0.15	100	0.28
15	125	0.06	0.25	20	0.35
16	125	0.08	0.2	50	0.4
17	100	0.04	0.15	20	0.33
18	150	0.06	0.2	20	0.34
19	125	0.08	0.25	100	0.45
20	100	0.08	0.15	100	0.43
21	125	0.06	0.15	50	0.29
22	150	0.08	0.25	20	0.4
23	125	0.08	0.2	20	0.42
24	100	0.06	0.25	50	0.44
25	125	0.08	0.15	20	0.38
26	125	0.04	0.2	100	0.29
27	125	0.04	0.25	100	0.32

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

28	100	0.04	0.2	50	0.34
29	125	0.04	0.15	20	0.29
30	125	0.04	0.25	50	0.33
31	100	0.06	0.15	100	0.34
32	100	0.06	0.2	100	0.38
33	150	0.06	0.25	50	0.32
34	125	0.06	0.2	50	0.33
35	125	0.06	0.15	20	0.3
36	150	0.08	0.15	100	0.35
37	125	0.08	0.15	100	0.37
38	100	0.06	0.15	50	0.35
39	100	0.08	0.2	50	0.47
40	100	0.08	0.25	20	0.48
41	125	0.04	0.2	20	0.32
42	125	0.06	0.15	20	0.3
43	150	0.04	0.15	20	0.24
44	100	0.04	0.15	50	0.32
45	100	0.08	0.25	50	0.485

2.2. Workpiece Material and Cutting Tools

The workpiece material used in this study was 90CrSi tool steel, a high-carbon, high-chromium alloy commonly employed in cold work die applications. The material was subjected to quenching and tempering heat treatment, achieving a final hardness of 56-60 HRC, classifying it as a hard-to-machine steel.

All experiments were performed using a single solid carbide end mill, model CEPR6120-TH with a diameter of Ø12 mm. The tool features 6 flutes (cutting edges) and is coated with a nano-composite coating specifically designed for hard milling operations. The nano-composite coating provides superior thermal stability and wear resistance, making it suitable for high-speed machining under minimal lubrication conditions.

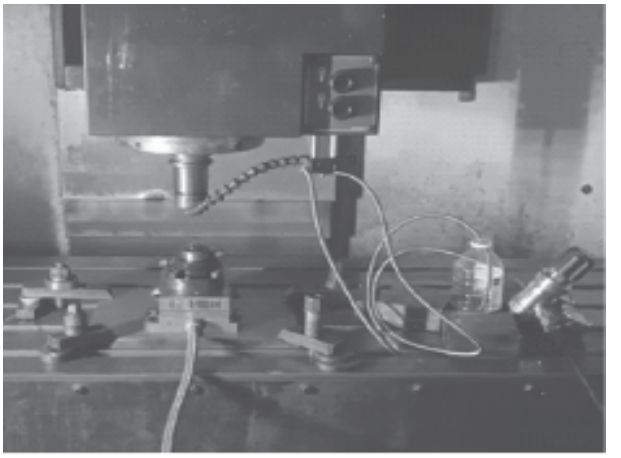


Figure 1. Experimental setup

2.3. Nano-MQL System and Lubricant Preparation

In this study, a Nano-MQL lubrication system was employed to enhance cooling and lubrication during hard milling. The lubricant was a mixture of canola oil (as base fluid) and copper oxide (CuO) nanoparticles, prepared at a concentration of 2 wt.%. To ensure uniform dispersion of nanoparticles and prevent agglomeration, the CuO particles were ultrasonically agitated in the base oil for 30 minutes before each experiment. The resulting nano-lubricant was delivered to the cutting zone through a standard MQL nozzle system. The flow rate of the nano-lubricant was maintained at 100 mL/h, and the compressed air pressure used to atomize and transport the fluid was set to 4 atm. The nozzle was positioned to direct the aerosol precisely at the tool–workpiece interface, ensuring efficient coverage of the cutting zone. The experimental setup was shown in Figure 1.

2.4. Response Measurement

For each experiment, the surface roughness (Ra) was measured using a ☞

Mitutoyo SJ-410 surface profilometer. Three measurements were taken along the machined surface for each trial, and the average value was used.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Regression Model for Surface Roughness

A second-order polynomial regression model was developed to predict surface roughness (Ra) as a function of cutting speed (v_c), feed per tooth (f_z), depth of cut (a_p), and nanoparticle size (D_{avg}). The model, based on coded variables and fitted using least squares, is presented below:

$$\begin{aligned} Ra = {} & 1.869\, a_p - 0.0006122\, D_{avg} - 5.487\, f_z \\ & - 0.006687\, v_c + 0.001962\, D_{avg} \cdot a_p \\ & - 0.005254\, a_p \cdot v_c + 0.007075\, f_z \cdot v_c + 2.315 \times 10^{-6}\, D_{avg}^2 \\ & - 1.176\, a_p^2 + 62.17\, f_z^2 + 2.396 \times 10^{-5}\, v_c^2 + 0.7018 \end{aligned} \quad (1)$$

This model explains the experimental behavior of Ra with high accuracy, achieving a coefficient of determination $R^2 = 0.968$. The predicted values closely follow the experimental measurements, confirming the model's reliability.

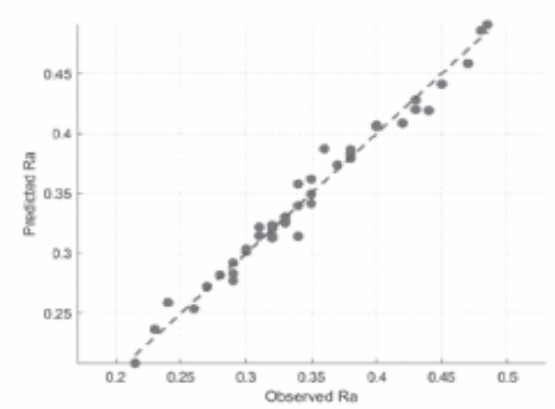


Figure 2. Regression plot

The regression plot (Figure 2) comparing observed and predicted Ra values shows a strong linear correlation, indicating high model accuracy. The tight clustering of points around the 45-degree reference line supports the model's predictive robustness for the range of conditions studied.

3.2. Influence of Process Parameters

The relative influence of each factor and their quadratic terms was evaluated through the standardized regression coefficients (Figure 3). The results show that:

- Feed per tooth (f_z) is the most influential parameter, exhibiting a strong positive quadratic effect, indicating that Ra increases rapidly as f_z increases.

- Cutting speed (v_c) and depth of cut (a_p) also have notable effects, but less dominant than f_z.

- The influence of nanoparticle size (D_{avg}) is relatively minor, though its interaction with f_z and a_p is statistically significant.

This agrees well with the main effects plot shown in Figure 4, where surface roughness tends to increase sharply with feed per tooth and depth of cut, while it decreases with increasing cutting speed. Interestingly, surface roughness decreases when increasing nanoparticle size from 50 to 100 nm, suggesting improved tribological behavior at higher nano-concentrations.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

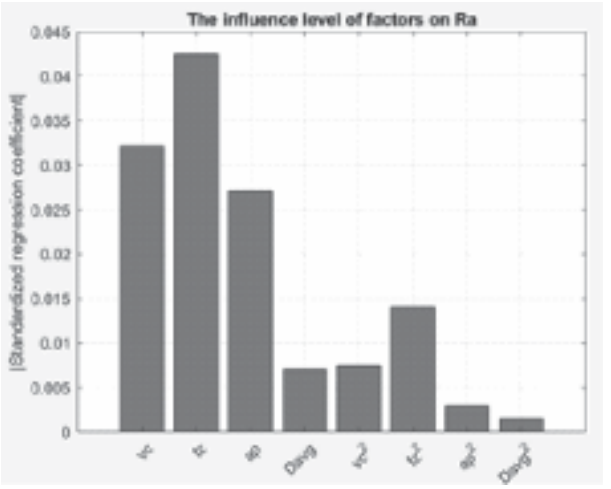


Figure 3. The standardized regression coefficients

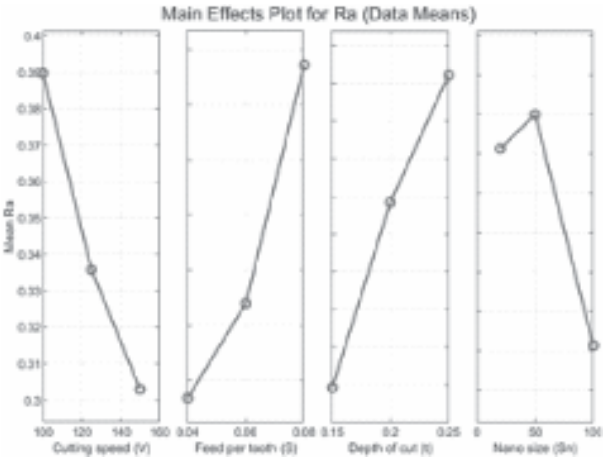


Figure 4. Main effects plot for Ra

3.3. Visual Analysis through Surface and Contour Plots

To visualize the combined effects of two key variables, the contour plot (Figure 5) and the surface plot (Figure 6) were constructed for Ra as a function of f_z and D_{avg}, while keeping v_c and a_p constant at their mid-levels.

- Both plots reveal that Ra increases with feed per tooth regardless of nanoparticle size.

- However, increasing D_{avg} tends to reduce Ra slightly, particularly at lower f_z values.

- The surface plot confirms a relatively smooth and predictable surface behavior, validating the applicability of the regression model for optimization purposes.

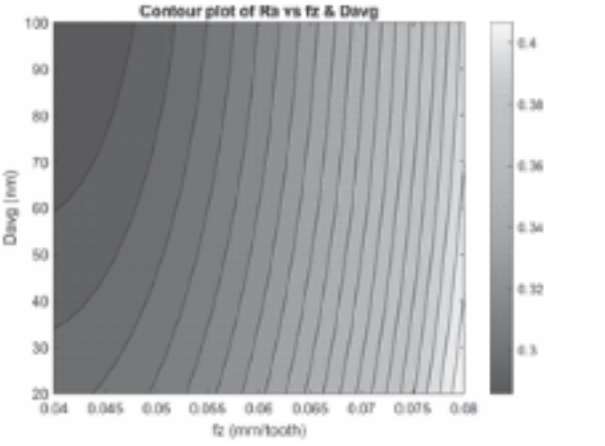


Figure 5. Contour plot for Ra

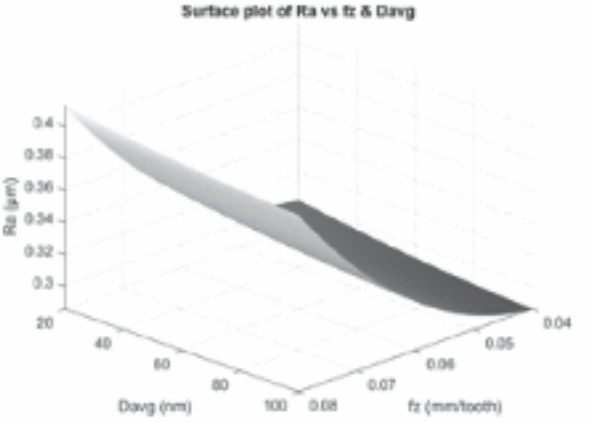


Figure 6. Surface plot for Ra

4. CONCLUSION

This study investigated the influence of cutting parameters and CuO nanoparticle size on surface roughness (Ra) during hard milling of 90CrSi tool steel using a Nano-MQL lubrication strategy. A Box–Behnken Design comprising 45 experiments was employed to model and analyze the behavior of Ra under varying conditions. ☞

A second-order regression model was developed and validated, showing a strong correlation between predicted and observed values with an R^2 of 0.968. The main findings can be summarized as follows:

- Feed per tooth (f_z) was identified as the most influential parameter affecting surface roughness, with a strong quadratic relationship indicating that small increases in f_z significantly worsen surface finish.

- Cutting speed (v_c) showed a negative correlation with Ra, suggesting improved surface finish at higher speeds.

- Depth of cut (a_p) also affected Ra, particularly through its interaction with other variables.

- The effect of CuO nanoparticle size (D_{avg}) was relatively moderate but became more apparent when interacting with other parameters.

- Increasing the nanoparticle size from 20 to 100 nm slightly improved surface finish, possibly due to enhanced lubrication and reduced friction at the cutting interface.

Main effects plots and contour surfaces provided clear visual support for the regression findings, and the developed model offers a reliable tool for optimizing machining parameters to improve surface quality in sustainable milling processes.

This work contributes to the understanding of hybrid Nano-MQL techniques and supports their application in precision machining of hard materials, enabling manufacturers to enhance surface integrity while maintaining eco-friendly practices.

Acknowledgment:

This research was supported by Thai Nguyen University of Technology (TNUT).❖

References:

[1]. O. Gutnichenko, S. G. Pozuelo, L. Llanes, and V. Bushlya, "*Analysis and Monitoring the Initial Tool Damage and Coating Failure when Hard Milling Vanadis 4E with TiAlN Coated PcB*N". Procedia CIRP, vol. 133, pp. 322-327, 2025.

[2]. H. Hassanpour, A. Rasti, J. H. Khosrowshahi, and S. S. Farshi, "*Effect of ball nose flank wear on surface integrity in high-speed hard milling of AISI 4340 steel using MQL*". Heliyon, vol. 10, no. 18, 2024.

[3]. T. Kaltenbrunner et al., "*Combined experimental and numerical analysis of critical loading conditions for hard metal tool damage in titanium milling*". Journal of Manufacturing Processes, vol. 77, pp. 125-137, 2022.

[4]. A. Vovk, J. Sölter, and B. Karpuschewski, "*Numerical investigation of the influence of multiple loads on material modifications during hard milling*". Procedia CIRP, vol. 102, pp. 500-505, 2021.

[5]. Q. Zhang, S. Zhang, and J. Li, "*Three dimensional finite element simulation of cutting forces and cutting temperature in hard milling of AISI H13 steel*". Procedia Manufacturing, vol. 10, pp. 37-47, 2017.

[6]. Duplicate of [1] (omitted in numbering to preserve citation integrity).

[7]. Duplicate of [2] (omitted in numbering).

[8]. Z. Liu et al., "*Energy consumption characteristics in finish hard milling*". Journal of Manufacturing Processes, vol. 35, pp. 500-507, 2018.

[9]. B. Li, T. Zhang, and S. Zhang, "*Deep cryogenic treatment of carbide tool and its cutting performances in hard milling of AISI H13 steel*". Procedia CIRP, vol. 71, pp. 35-40, 2018.

[10]. B. Beake et al., "*Wear performance of different PVD coatings during hard wet end milling of H13 tool steel*". Surface and Coatings Technology, vol. 279, pp. 118-125, 2015.

[11]. H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, and S. Shajari, "*Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication*". Journal of Cleaner Production, vol. 120, pp. 124-134, 2016.

[12]. Q. An, C. Wang, J. Xu, P. Liu, and M. Chen, "*Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool*". International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 43, pp. 94-101, 2014.

[13]. B. Denkena, J. Köhler, and B. Bergmann, "*Development of cutting edge geometries for hard milling operations*". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 8, pp. 43-52, 2015.

[14]. Z. Liu, Y. Guo, M. Sealy, and Z. Liu, "*Energy consumption and process sustainability of hard milling with tool wear progression*". Journal of Materials Processing Technology, vol. 229, pp. 305–312, 2016.

[15]. T. Teppernegg et al., "*Evolution of residual stress and damage in coated hard metal milling inserts over the complete tool life*". International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 47, pp. 80-85, 2014.

[16]. T. Teppernegg, P. Angerer, T. Klünsner, C. Tritremmel, and C. Czettl, "*Evolution of residual stress in Ti-Al-Ta-N coatings on hard metal milling inserts*". International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 52, pp. 171-175, 2015.

[17]. R. Bian, E. Ferraris, N. He, and D. Reynaerts, "*Process investigation on meso-scale hard milling of ZrO_2 by diamond coated tools*". Precision Engineering, vol. 38, no. 1, pp. 82-91, 2014.

[18]. K. Jayakumar and P. A. Rahman, "*Effect of end milling parameters on MRR and hardness variation of AA7075*". Materials Today: Proceedings, vol. 72, pp. 2212-2216, 2023.

[19]. A. Tamilarasan, D. Rajamani, and A. Renugambal, "*An approach on fuzzy and regression modeling for hard milling process*". Applied Mechanics and Materials, vol. 813, pp. 498-504, 2015.

[20]. M. Jenarthanan and N. Neeli, "*Optimization of process parameters on machining force and MRR in milling of GFRP composites using grey relational analysis*". i-Manager's Journal on Material Science, vol. 1, no. 3, p. 29, 2013.

[21]. S. K. Khare, P. Gulati, and J. P. Singh, "*Enhancing MRR in face milling by varying cutting speed*". Materials Today: Proceedings, 2023.

[22]. J. MP, P. K. R. Gavireddy, C. S. Gummadi, and S. R. Mandapaka, "*Optimization of process parameters on machining force and MRR during end milling of GFRP composites using GRA*". World Journal of Engineering, vol. 15, no. 3, pp. 407-413, 2018.

[23]. Q.-M. Nguyen and T.-V. Do, "*Optimal approaches for hard milling of SKD11 steel under MQL conditions using SiO_2 nanoparticles*". Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2022, no. 1, p. 2627522, 2022.

SURFACE ROUGHNESS OPTIMIZATION IN EDM CONSIDERING GRAPHITE ELECTRODE TYPE USING GAUSSIAN PROCESS REGRESSION

TỐI ƯU HÓA ĐỘ NHÁM BỀ MẶT TRONG GIA CÔNG XUNG ĐIỆN EDM CÓ XÉT ĐẾN LOẠI VẬT LIỆU ĐIỆN CỰC GRAPHITE BẰNG MÔ HÌNH HỒI QUY QUÁ TRÌNH GAUSSIAN

Truong Thi Thu Huong[1], Vu Trung Tuyen[2], Nguyen Thi Quoc Dung[1], Le Thi Phuong Thao[1,*]
[1]Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen, Vietnam
[2]National Research Institute of Mechanical Engineering, Hanoi, Vietnam
**Email: lethao828@tnut.edu.vn*

ABSTRACT

In this study, a Gaussian Process Regression (GPR) model was developed to predict and optimize surface roughness (Ra) in electrical discharge machining (EDM), considering the influence of graphite electrode types. A Box–Behnken Design (BBD) was employed, involving four process parameters discharge current (IP), servo voltage (SV), pulse on-time (T_{on}), pulse off-time (T_{off}) and the electrode material type (TOG), to systematically collect experimental data. The GPR model was trained on the collected dataset and achieved a high coefficient of determination (R^2), demonstrating its superior ability to capture nonlinearities and stochastic variations in Ra during EDM. Single-objective optimization was performed using MATLAB®'s fmincon algorithm to identify the optimal combination of process parameters that minimizes surface roughness. The results confirm the effectiveness of GPR in predicting and optimizing Ra, while highlighting the significant impact of graphite electrode material type on surface quality. The proposed method offers strong potential for broader applications in precision electro-discharge machining process optimization.

Keywords: *Electrical discharge machining (EDM); Surface roughness; Gaussian Process Regression (GPR); Single-objective optimization; Graphite electrode material; Predictive modeling.*

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, một mô hình hồi quy quá trình Gaussian (Gaussian Process Regression – GPR) đã được xây dựng để dự đoán và tối ưu hóa độ nhám bề mặt (Ra) trong quá trình gia công xung điện (EDM), có xét đến ảnh hưởng của loại vật liệu điện cực graphite. Thiết kế thí nghiệm Box–Behnken (BBD) với bốn thông số đầu vào gồm cường độ dòng điện (IP), điện áp phóng điện (SV), thời gian phát xung (T_{on}), thời gian ngắt xung (T_{off}) và loại vật liệu điện cực graphite đã được sử dụng nhằm thu thập dữ liệu thực nghiệm. Mô hình GPR được huấn luyện trên bộ dữ liệu thu thập được, cho kết quả hệ số xác định (R^2) cao, thể hiện khả năng mô hình hóa chính xác tính phi tuyến và sự biến thiên ngẫu nhiên của Ra trong quá trình EDM. Quá trình tối ưu hóa được thực hiện bằng thuật toán fmincon trong MATLAB®, nhằm tìm ra tổ hợp thông số công nghệ tối ưu cho mục tiêu

giảm thiểu độ nhám bề mặt. Kết quả nghiên cứu khẳng định tính hiệu quả của phương pháp GPR trong việc dự đoán và tối ưu hóa Ra, đồng thời cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của loại vật liệu điện cực graphite đến chất lượng bề mặt. Phương pháp đề xuất mở ra triển vọng áp dụng rộng rãi trong tối ưu hóa quá trình gia công điện hóa chính xác.

Từ khóa: *Gia công xung điện (EDM); Nhám bề mặt; Mô hình hồi quy quá trình (GPR); Tối ưu đơn mục tiêu; Vật liệu điện cực graphite; Mô hình dự đoán.*

1. INTRODUCTION

Electrical discharge machining (EDM) has been widely investigated as an effective method to enhance machining performance by dispersing conductive or semi-conductive powders into the dielectric fluid. The addition of powders modifies the electrical field distribution, improves debris removal, stabilizes the discharge gap, and ultimately enhances surface quality and material removal rate (MRR).

Phan et al. [1] applied multi-criteria decision-making (MCDM) techniques to determine the optimal input factors for PMEDM of 90CrSi steel. Their study successfully identified parameter combinations that improved both MRR and surface finish. Similarly, Yonel et al. [2] conducted a comparative study on PMEDM of biomedical Ti29Nb13Ta4.6Zr alloys, emphasizing the role of carbon and oxygen atoms in enhancing machining efficiency. Kumar et al. [3] optimized PMEDM parameters for machining MONEL 400 superalloy using Taguchi and RSM methods, achieving significant improvements in machining precision. Huu et al. [4] combined response surface methodology (RSM) with an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to optimize surface quality in PMEDM with SiC powders, demonstrating better accuracy compared to traditional RSM models. Behera et al. [5] experimentally compared plain and nano-graphene oxide mixed dielectrics in EDM of Nimonic alloys, finding that nano-graphene oxide significantly improved both surface finish and machining sustainability. Han et al. [6], [7] optimized process parameters in ultrasonic vibration-assisted PMEDM of TiN ceramics, reporting that ultrasonic vibration synergistically enhanced MRR and reduced surface defects. Chaudhari et al. [8] explored the use of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and nano-graphene particles in PMEDM of Udimet-720 alloy, resulting in notable improvements in surface morphology and machining efficiency. Sonawane et al. [9] employed advanced multi-objective optimization algorithms for PMEDM of tool steels, highlighting the benefits of hybrid optimization techniques in balancing MRR and surface integrity. Sethy et al. [10] introduced a sustainable approach by dispersing graphite powders into biodegradable palm oil dielectric during EDM of SS316 stainless steel. Their study demonstrated that using green dielectrics could maintain good surface quality while reducing environmental impact. Ekmekci and Ersöz [11] earlier investigated how suspended particles affect surface morphology in PMEDM, establishing foundational insights into micro-crater formation and surface modification. Ghulam and Ibrahim [12] examined the heat-affected zone (HAZ), surface roughness, and MRR in nano-powder mixed EDM (NPMEDM) of Inconel 718, showing that nano-silicon carbide powders ☞

effectively minimized surface damage. Rao et al. [13] optimized multi-response outputs when machining with powder metallurgy electrodes composed of micron and nano-sized particles, achieving improvements in both productivity and surface characteristics. Le Quang et al. [14] enhanced machining productivity in PMEDM of titanium alloys by applying low-frequency vibrations to the workpiece, confirming the positive effects of mechanical–electrical hybrid excitation. Biswal et al. [15] optimized PMEDM process parameters for Ti-6Al-7Nb biomedical materials, validating that powder addition significantly improves biocompatibility and surface finish.

Although these studies have advanced PMEDM technology, traditional modeling approaches such as RSM often fail to accurately capture the complex, nonlinear, and stochastic nature of surface roughness formation. Machine learning techniques, especially Gaussian Process Regression (GPR), offer a powerful alternative for building predictive models with uncertainty quantification. Therefore, this study proposes a GPR-based modeling and optimization framework for predicting and minimizing surface roughness (Ra) in PMEDM, considering the influence of graphite electrode materials. The proposed method aims to provide higher prediction accuracy and a robust strategy for selecting optimal machining conditions.

2. METHODOLOGY

2.1. Experimental Design

The experiments were conducted based on a systematic experimental design framework to investigate the effects of key process parameters on surface roughness (Ra) in electrical discharge machining (EDM). Five variables were considered: Discharge current IP (A), Servo voltage SV (V), Pulse on-time T_{on} (µs), Pulse off-time T_{off} (µs), and type of electrode material: Graphite grade (HK0, HK15, HK20). The experimental matrix was constructed using the Taguchi method with an L18 ($6^1 \times 3^4$) orthogonal array. This approach allows efficient exploration of main effects with reduced experimental runs. The Taguchi method, applied via Minitab® R19 software, served as a robust strategy for improving quality by minimizing experimental time and cost, while maximizing process reliability and fostering innovation through systematic variation of factors.

The experimental setup, illustrated in Figure 1, included: Sodick A30 EDM machine, Mitutoyo 178-923-2A surface roughness tester, Samples made of 90CrSi tool steel, Graphite electrodes (different grades), Diel MS 7000 dielectric solution. For each experimental run, the surface roughness (Ra) of each machined sample was measured immediately after each run.

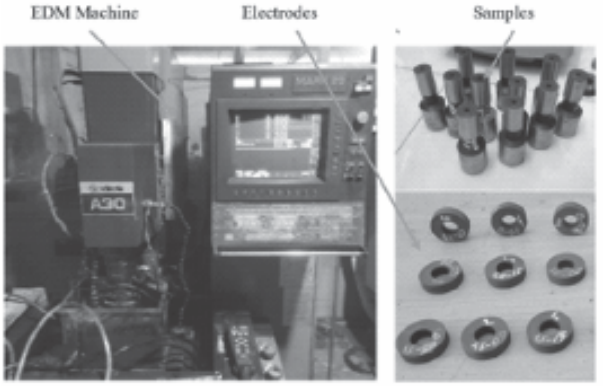


Figure 1. Experimental setup

2.2. Data Preprocessing and Encoding

Prior to modeling, the electrode material type was encoded numerically to enable its

inclusion in regression and machine learning algorithms: HK0 → 0, HK15 → 1, and HK20 → 2. The complete dataset thus consisted of five input features: IP, SV, T_{on}, T_{off}, and encoded electrode type. All input variables were standardized (zero mean and unit variance) before model training to ensure numerical stability and enhance model performance.

2.3. Gaussian Process Regression (GPR) Modeling

A Gaussian Process Regression (GPR) model was developed to predict surface roughness (Ra) based on the experimental data. GPR was selected due to its superior ability to capture complex nonlinear relationships and quantify prediction uncertainty, which is crucial for precision machining applications.

The GPR model was trained using:

- A constant basis function;
- A squared exponential (Gaussian) kernel function;
- Automatic hyperparameter optimization based on maximizing marginal likelihood.

The performance of the GPR model was evaluated using:

- Coefficient of determination (R^2);
- Residual plots (predicted vs. actual Ra);
- Prediction standard deviation (uncertainty quantification).

For benchmarking purposes, a second-order response surface model (RSM) was also constructed using least squares regression and compared to the GPR model.

Table 1. Experimental matrix and output results

No.	IP (A)	SV (V)	T_{on} (µs)	T_{off} (µs)	TOG	SR (µm)
1	3.5	4	8	8	HK0	3.917
2	3.5	5	12	12	HK15	4.093
3	3.5	6	16	16	HK20	4.704
4	5.5	4	8	12	HK15	4.217
5	5.5	5	12	16	HK20	3.948
6	5.5	6	16	8	HK0	4.443
7	7.5	4	12	8	HK20	3.814
8	7.5	5	16	12	HK0	2.744
9	7.5	6	8	16	HK15	3.142
10	9.5	4	16	16	HK15	3.772
11	9.5	5	8	8	HK20	2.618
12	9.5	6	12	12	HK0	2.050
13	11.5	4	12	16	HK0	3.524
14	11.5	5	16	8	HK15	3.908
15	11.5	6	8	12	HK20	4.087
16	13.5	4	16	12	HK20	6.354
17	13.5	5	8	16	HK0	3.688
18	13.5	6	12	8	HK15	5.453

2.4. Optimization Strategy

The trained GPR model was utilized as a surrogate model for single-objective optimization targeting the minimization of surface roughness. The optimization problem was formulated as:

$$\min_{x \epsilon D} R_a GPR(x) \quad (1)$$

In which, x = [A, T_{on}, T_{off}, IP, SV] represents the input variable vector, and D is the feasible domain defined by the lower and upper bounds of each parameter based on the experimental design.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. GPR Model Accuracy Evaluation

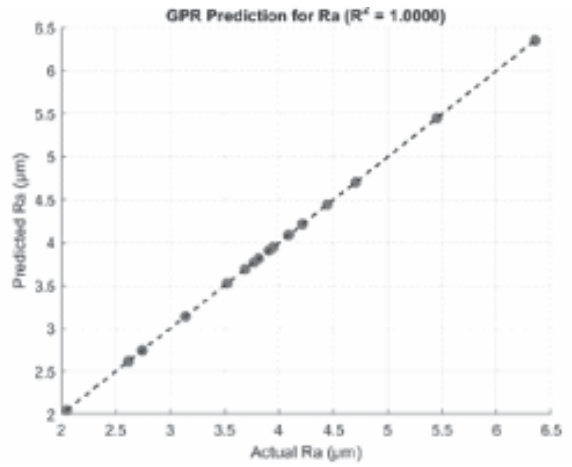


Figure 2. Predicted vs. Actual Ra values (GPR)

The Gaussian Process Regression (GPR) model developed for predicting surface roughness (Ra) demonstrated excellent predictive accuracy. As shown in Figure 2, the predicted Ra values exhibit a near-perfect match with the actual experimental measurements, yielding an R^2 value of 1.0000. This indicates that the model was able to capture 100% of the variance in the experimental data, with minimal deviation across the entire range of Ra values. The scatter plot shows that all data points are tightly clustered along the ideal diagonal y = x line, suggesting a highly reliable model without observable bias or systematic errors. This outstanding prediction capability confirms that GPR is well suited for modeling the complex, nonlinear behaviors of Ra in EDM processes. Such a high R^2 value, although impressive, may indicate that the experimental dataset has a relatively low level of stochastic variability or that the input features effectively capture the main factors influencing surface roughness.

3.2. Optimization Results

Optimization was performed based on the trained GPR model using MATLAB®'s fmincon solver with Sequential Quadratic Programming (SQP). The optimization targeted the minimization of Ra within the bounds of the experimental design space. The resulting optimal machining parameters are summarized as follows: IP = 9.4779 A, SV = 5.9864 V, T_{on} = 12.0450 µs, T_{off} = 12.0118 µs, Graphite Material Type = HK0 (encoded as 0). Under these conditions, the minimum predicted Ra was 2.0492 µm.

The comparison between the actual Ra values from the experimental runs and the optimized Ra is illustrated in Figure Y. It can be clearly observed that the optimized Ra (represented as a horizontal dashed line) is substantially lower than the majority of the actual Ra values achieved in the experiments. This highlights the capability of the GPR model not only in accurate prediction but also in guiding the search for significantly improved machining conditions. The optimized Ra value of 2.0492 µm is notably lower than the average Ra values recorded during the experimental

campaign, which ranged from approximately 2.5 μm to over 6.0 μm. This result strongly supports the effectiveness of the GPR-based optimization approach in enhancing surface quality in PMEDM.

3.3. Residual and Uncertainty Analysis

Residual analysis was conducted to validate the generalization capability of the GPR model. The residuals, calculated as the differences between actual and predicted Ra values, were found to be uniformly distributed around zero without significant patterns, further confirming that no overfitting occurred. Moreover, the standard deviation associated with each GPR prediction was analyzed to assess prediction uncertainty. The uncertainty estimates were generally low, particularly near the center regions of the experimental design space where data density was highest. Slight increases in uncertainty were observed at boundary conditions, as typically expected in GPR due to sparser training data in those regions.

The low residuals and reasonable uncertainty behavior demonstrate that the developed GPR model not only fits the experimental data very closely but also provides reliable predictions across the design space.

4. CONCLUSION

In this study, a Gaussian Process Regression (GPR)-based modeling and optimization framework was successfully developed to predict and minimize surface roughness (Ra) in electrical discharge machining (EDM) processes, considering the influence of graphite electrode materials. The main conclusions are summarized as follows:

1) The GPR model exhibited excellent predictive accuracy for Ra, achieving a coefficient of determination (R^2) of 1.0000. The predicted Ra values closely matched the experimental results across the entire design space, confirming the model's capability in capturing the complex and nonlinear nature of the EDM process.

2) Optimization based on the GPR model led to a minimum predicted Ra of 2.0492 μm, under the optimal machining conditions: IP = 9.4779 A, SV = 5.9864 V, T_{on} = 12.0450 μs, T_{off} = 12.0118 μs, and the use of HK0 grade graphite electrodes. The optimized Ra value was significantly lower than the average experimental Ra, demonstrating the effectiveness of the GPR-based optimization strategy.

3) Residual and uncertainty analyses further validated the robustness and reliability of the GPR model. The residuals were randomly distributed with low magnitudes, and prediction uncertainties were generally low, particularly near the center of the design space.

4) The graphite electrode material was found to be an important influencing factor, highlighting the necessity of incorporating material-related parameters into predictive modeling for surface finish control.

Overall, the proposed GPR-based approach proves to be a powerful and reliable tool for data-driven modeling and optimization in EDM. It provides a solid foundation for future extensions into multi-objective optimization frameworks that simultaneously consider Ra and material removal rate (MRR) for comprehensive process improvement.

Acknowledgements:

This work was supported by Thai Nguyen University of Technology (TNUT).❖

References:

[1]. D. P. Phan, D. B. Vu, and N. P. Vu, "*Determination of Best Input Factors in Powder-Mixed Electrical Discharge Machining 90CrSi Steel using Multi-Criteria Decision Making Methods*". Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 15, no. 1, pp. 19121-19127, 2025.

[2]. D. Yonel et al., "*A Comparative Study on the Powder-Mixed Electric Discharge Machining (PMEDM) of Novel Ti29Nb13Ta4.6Zr (TNTZ) Biomedical Alloys: The Effect of C and O Atoms*". Arabian Journal for Science and Engineering, pp. 1-22, 2025.

[3]. A. Kumar, M. Nikam, T. Jagadeesha, A. U. Rehman, A. S. Bhongade, and T. Shivagond, "*PMEDM process parameter optimization for machining superalloy MONEL 400*". Materials Research Express, 2025.

[4]. P. N. Huu, S. Shirguppikar, V. Ganachari, T. Muthuramalingam, and L. N. Trong, "*Optimizing surface quality in PMEDM using SiC powder material by combined solution response surface methodology – Adaptive neuro fuzzy inference system*". Journal of the Mechanical Behavior of Materials, vol. 34, no. 1, p. 20250051, 2025.

[5]. A. Behera, A. K. Sahoo, and S. S. Mahapatra, "*Experimental investigation of plain and nano-graphene oxide mixed dielectric for sustainable EDM of Nimonic alloy using Cu and Brass electrode: A comparative study*". Measurement, vol. 241, p. 115659, 2025.

[6]. J. Han et al., "*Optimization of Process Parameters in Ultrasonic Vibration-Assisted Powder-Mixed Electrical Discharge Machining of TiN Ceramics*". Journal of Materials Engineering and Performance, pp. 1-14, 2025.

[7]. J. Han et al., "*Optimization of Process Parameters in Ultrasonic Vibration-Assisted Powder-Mixed Electrical Discharge Machining of TiN Ceramics*". Journal of Materials Engineering and Performance, pp. 1-14, 2025.

[8]. R. Chaudhari, I. Ayesta, S. Khanna, V. K. Patel, J. Vora, and L. N. L. De Lacalle, "*Experimental investigations of using MWCNTs and nano-graphene particles for the enhancement of machining performance using powder-mixed EDM of Udimet-720*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 136, no. 1, pp. 145-157, 2025.

[9]. G. D. Sonawane, V. Sulakhe, R. Dalu, K. Kaware, and A. Motwani, "*Multi-Objective Optimization of Powder-Mixed Electro-Discharge Machining of Tool Steel Using Advanced Algorith*m". SAE International Journal of Materials and Manufacturing, vol. 18, no. 05-18-03-0021, 2025.

[10]. S. Sethy, S. R. Das, J. Rana, A. K. Behera, and M. K. Gupta, "*Performance evaluation and economic assessment in electrical discharge machining of SS316 using graphite powder dispersed in biodegradable palm oil dielectric*". Surface Review and Letters, vol. 32, no. 03, p. 2450120, 2025.

[11]. B. Ekmekci and Y. Ersöz, "*How suspended particles affect surface morphology in powder mixed electrical discharge machining (PMEDM)*". Metallurgical And Materials Transactions B, vol. 43, pp. 1138-1148, 2012.

[12]. D. A. Ghulam and A. F. Ibrahim, "*Studying Heat-Affected Zone, Surface Roughness and Material Removal Rate in PMEDM Process for Inconel 718 Using Nano Silicon Carbide Powder*". Tikrit Journal of Engineering Sciences, vol. 32, no. 1, pp. 1-13, 2025.

[13]. P. S. Rao, S. Prasad Dora, and N. Sarada Purnima, "*Multi-response optimisation of EDM process machined by P/M electrodes made of micron and nano level particles*". Advances in Materials and Processing Technologies, vol. 11, no. 1, pp. 128-151, 2025.

[14]. D. Le Quang, P. N. Huu, D. T. Van, T. N. Van, and M. Thangaraj, "*Enhancing the machining productivity in PMEDM for titanium alloy with low-frequency vibrations associated with the workpiece*". Journal of the Mechanical Behavior of Materials, vol. 33, no. 1, p. 20240009, 2024.

[15]. S. Biswal, S. Tripathy, and D. Tripathy, "*Optimisation of PMEDM process parameters for Ti-6Al-7Nb biomedical material*". Materials Today: Proceedings, 2024.

STRAIN LOCALIZATION AND FRACTURE STRAIN PATH IN A HIGH-STRENGTH 7075 ALUMINUM ALLOY

BIẾN DẠNG CỤC BỘ VÀ QUÁ TRÌNH BIẾN DẠNG PHÁ HỦY TRÊN HỢP KIM NHÔM 7075 ĐỘ BỀN CAO

Hung Quach, Nguyen Hong Linh, Le Ha An
Mechanical-Automotive and Civil Engineering Faculty, Electric Power University

ABSTRACT

The significantly increased demand of lower CO_2 emission, fuel-efficient, and lightweight has driven the advancement of lightweight materials. Aluminum alloys 7075 owing to its excellent mechanical properties and high strength-to-weight ratio, were widely used in many industry applications. In this study, a series of upsetting tests was carried out on high strength aluminum alloy 7075 at room temperature to evaluate the strain localization and the evolution of fracture strain path evolution during plastic deformation process. Many different types of specimens were tested to characterize fracture behavior in in-plane shear, uniaxial tension, and plane strain tension. Fracture strains under various loading conditions were measured using a 3D-Digital Image Correlation (DIC) system.

Keywords: *Digital Image Correlation; Mechanical properties; Measurement.*

TÓM TẮT

Nhu cầu gia tăng một cách đáng kể về giảm lượng khí thải CO_2, tiết kiệm nhiên liệu và trọng lượng nhẹ đã thúc đẩy sự phát triển của các vật liệu nhẹ. Hợp kim nhôm 7075 do có các đặc tính cơ học xuất sắc cùng với tỷ lệ độ bền trên trọng lượng rất cao, được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng công nghiệp. Trong nghiên cứu này, một loạt các thí nghiệm phức tạp đã được thực hiện trên hợp kim nhôm độ bền cao 7075 ở nhiệt độ phòng để đánh giá vị trí biến dạng và sự phát triển của đường biến dạng dẫn tới phá hủy trong quá trình biến dạng dẻo. Nhiều kiểu mẫu thí nghiệm khác nhau đã được thực hiện để mô tả hành vi biến dạng dẫn đến phá hủy trong trạng thái xé đơn, kéo đơn trục và kéo biến dạng phẳng. Giá trị biến dạng dẫn đến phá hủy trong các điều kiện tải khác nhau được đo bằng hệ thống tương quan hình ảnh kỹ thuật số 3D (DIC). Biến dạng phá hủy trên bề mặt của các mẫu được sử dụng để xây dựng quỹ tích phá hủy dẻo trên bề mặt vật liệu cho AA7075.

Từ khóa: *Đo lường không tiếp xúc; Ứng suất; Biến dạng phá hủy.*

1. INTRODUCTION

In recent years, weight reduction has long been indicated as a key priority for improving fuel economy. One of the leading trends in weight reduction in the automotive and aerospace industries is change from steel to aluminum alloys. Aluminum alloys show various advantages compare to steel such as weight reduction, corrosion resistance, high strength-to-weight ratio, and manufacturing flexibility… Aluminum alloy AA7075 has large applications in aircrafts, missiles and automobiles for many components. In the present study, the fracture behavior and evaluation of 7075 aluminum alloy was studied under different stress-states in order to explore the characteristics of the material under extreme situations. A series types of tests was carried out covering a wide range of stress states on specimens: uniaxial tensile test, shear test, plane strain test at room temperature. Additionally, the non-contact measurement method, 3D Digital Image Correlation (DIC), also was applied to obtain the deformation during experiment process.

Figure 1 shows a DIC system using to monitor the tensile specimen surface [1]. DIC measurement device generally uses an optical system to measure displacement, strain and deformation fields of an in-plane surface or out of plane surface of specimens [2]. Series of digital images on the surface of object at different loadings states are captured during the test, then matching algorithms and numerical differentiation are applied to quantitatively extract full-field displacement and strain responses of the object.

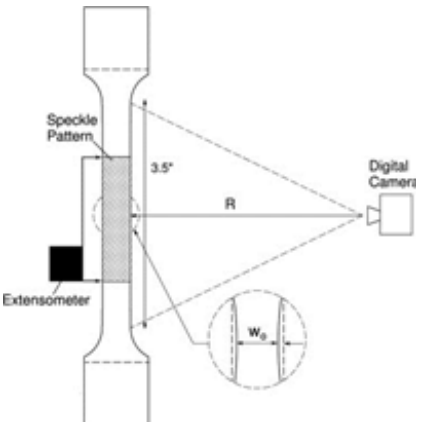


Figure 1. 2D Digital image correlation techniques in tensile test [1]

2. EXPERIMENTS

2.1. Material and specimens

The material studied in this paper was aluminum alloy 7075-T761. It is a representative of the class of advanced high-strength aluminum which are increasingly important in lightweight materials. All specimens are extracted from 1.5mm thick sheets with the longitudinal axis along the rolling direction. The chemical composition of AA7075 is given in Table 1.

Table 1. Chemical composition (% wt) of the investigated alloy

Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Cr	Ti	Al
5.8	2.5	1.6	0.28	0.40	0.35	0.21	0.19	Balance

Three different types of specimens were extracted from the original aluminum sheets, as follows: (a) (a) Central hole (CH) specimens, which feature a 20-mm wide gauge section with an 8-mm diameter hole in the center; (b) Plane strain (PS) specimens, which have a 10-mm width at the narrowest section and a 20-mm width at the widest section; (c) The in-plane

shear tension specimen geometry was employed in this study for quasi-static shear testing. These shear specimens can be used for both constitutive modeling and fracture characterization.

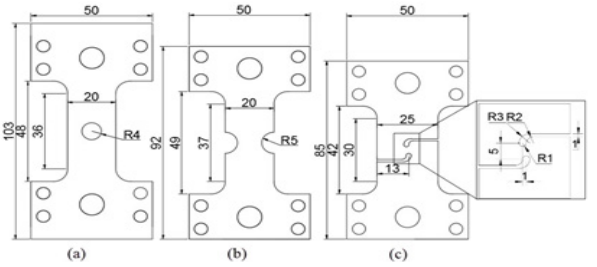


Figure 2. Type of specimens: (a) Central hole, (b) Plane strain, (c) in-plane shear [3]

2.2. Experiment setup

In this study, a 3D-DIC measurement system was employed to conduct all the upsetting test. There are two 5Mp camera were adopted for recording the surface of specimens at the time of experiments. The tension test was performed under displacement control in a universal testing machine run at a rate of 0.5 mm/min, the deformation resulted in a strain rate of $10^{-4}s^{-1}$. To allow the DIC captures the specimens surface, a fine speckle pattern was painted onto one side surface of the specimen. The deformation of the specimen was monitored with two digital cameras equipped with a timer that recorded 5 frames every single second.



Figure 3. Two typical DIC techniques and their imaging models and system.

In these experiments, some points need to clarified here for the measurement of fracture strain surface. Firstly, the von Mises equivalent strain is the output data for the study of ductile fracture for all loading conditions and no additional input is required in advance of measurement. Secondly, the fracture strain measured by DIC is supposed as pure plastic fracture strain. Ductile fracture takes place after large plastic deformation and the elastic deformation is negligible compared to the large plastic components. Besides, ductile fracture is assumed to initiate on specimen surfaces and can be measured directly with the DIC method. This is valid for sheet metals with poor ductility such as advanced high strength steel, aluminum alloys, titanium alloys, magnesium alloys, etc. Aluminum alloy 7075-T76 show a poor ductility with short elongation with very high strength. The failure happens from the inside and suddenly spread outward to the surface of material. Because this failure process is extremely fast and suddenly, ductile fracture is assumed to exit on the surface of material.

3. CONSTRUCTION OF THE FRACTURE STRAIN PATH

To construct the fracture locus of Al7075 using ductile fracture criterion proposed in the space of stress triaxiality (η) and equivalent plastic strain to fracture ($\bar{\varepsilon}$). The equivalent plastic strain to fracture was measured using 3D DIC for all specimens, including central hole tension specimens, pure shear tension specimens, and plane strain tension specimens. The strain distributions are carried out at fracture strokes for each specimen.

Stress triaxiality is defined as the ratio of mean stress (σ_m) to the equivalent stress (σ_e). Based on the J_2 theory, this ratio can be calculated as follows [4]: ☞

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (1)$$

Here σ_i are the principal stresses.

In the plane-stress condition, stress triaxiality can be calculated as:

$$\eta = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)/3}{\sqrt{\sigma_1{}^2 + \sigma_2{}^2 - \sigma_1\sigma_2}} \quad (2)$$

By using the flow rule, we derive the following relationship to carry out the stress triaxiality from the DIC results.

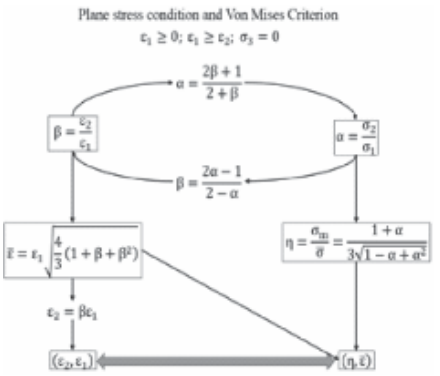


Figure 4. Transformation between two different spaces: principal strain and mixed space of equivalent strain and stress triaxiality

Figure 5 shows the strain path to fracture on the surface of three types of specimens in the space of stress triaxiality and equivalent plastic strain to fracture. A wide range of stress triaxiality was observed from near zero (in-plane shear tension) to uniaxial tension (central hole tension) and plane strain. Strain localization varies for each type of specimen. In in-plane shear tension and plane strain tension, local deformation occurs at the center of the deformed area, whereas in central hole tension, local deformation is concentrated along the edge of the circular hole.

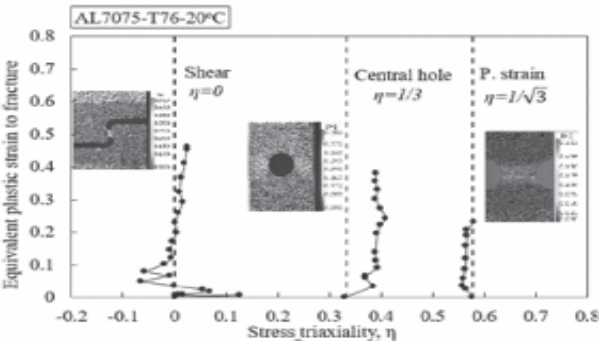


Figure 5. Strain path to fracture for AA7075 calculated by using 3D-DIC

4. CONCLUSIONS

In this research, a wide range of upsetting tests were carried out on high-strength aluminum alloy 7075-T761 at room temperature to obtain the surface strain evolution and surface strain path to fracture during plastic deformation. The details of the algorithm method and the setup of the optical system were explained. Different specimen types were tested to characterize fracture behavior in in-plane shear, central hole, and plane strain tension. Local strain and the evolution of strain paths under various loading conditions were measured by 3D Digital image correlation (DIC) to construct fracture strain path for AA7075.

References:

[1]. Tardif, N., & Kyriakides, S. (2012), "*Determination of anisotropy and material hardening for aluminum sheet metal*". International Journal of Solids and Structures, 49 (2012), 3496-3506.

[2]. Pan, B. (2018), "*Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals*". Measurement Science and Technology, 29(8), 082001.

[3]. Lou, Y.S. and Huh, H. (2013), "*Prediction of ductile fracture for advanced high strength steel with a new criterion: experiment and simulation*". Journal of Materials Processing Technology, 213, 1284-1302.

[4]. Hung, Q., Kim, J.-J., Nguyen, D. T., Kim, Y.-S. (2020), "*Uncoupled ductile fracture criterion considering secondary void band behaviors for failure prediction in sheet metal forming*". International Journal of Mechanical Sciences, 169, 105297.

FABRICATE A SOFT ROBOTIC ACTUATOR USING FDM 3D PRINTING

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO TAY GẮP MỀM BẰNG PHƯƠNG PHÁP IN 3D FDM

Vo Ngoc Anh Tuan*, Nguyen Duc Nhan, Phan Xuan Vu Kha
Faculty of Mechanical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT)
**Corresponding author email: vnatuan@hcmut.edu.vn*

ABSTRACT

This work presents a novel solution for directly 3D printing soft actuators using 3D printers based on fused deposition modeling (FDM) technology. Traditionally, soft actuators are fabricated through molding and forming due to the simplicity of the process and the affordability of the materials. However, the drawbacks of this method include low productivity, a higher likelihood of common errors, and limitations in fabricating soft actuators with complex and sophisticated inner structures. To address these issues, 3D printing offers a highly accessible approach to meet the requirements, utilizing low-cost 3D printers and inexpensive soft materials. In this paper, we design a soft actuator made of a soft material, optimize the printing settings for FDM 3D printers, and examine the application of the soft actuator.

Keywords: *Soft actuator; 3D printing; Soft material; TPU.*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này giới thiệu một giải pháp mới để in 3D trực tiếp các tay gắp mềm bằng cách sử dụng các máy in 3D dựa trên công nghệ đùn vật liệu trực tiếp (FDM). Thông thường, các tay gắp mềm được chế tạo thông qua khuôn đúc và tạo hình dựa trên sự đơn giản của quá trình và giá thành vật liệu. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này bao gồm năng suất thấp, nguy cơ xảy ra các lỗi thường gặp cao hơn, và hạn chế trong việc chế tạo các tay gắp mềm có cấu trúc bên trong phức tạp và tinh vi. Để khắc phục các vấn đề này, công nghệ in 3D cung cấp một cách tiếp cận khả thi để đáp ứng các yêu cầu được đưa ra từ người tiêu dùng chỉ bằng việc sử dụng máy in 3D chi phí thấp và vật liệu mềm giá rẻ. Trong bài báo này, chúng tôi thiết kế một tay gắp mềm làm từ vật liệu mềm, tối ưu hóa các thiết lập in cho máy in 3D FDM, và nghiên cứu ứng dụng của tay gắp mềm này.

Từ khóa: *Tay gắp mềm; In 3D; Vật liệu mềm; Nhựa TPU.*

1. INTRODUCTION

Soft robotics is a subfield of robotics whereby the robots are made of soft and compliant components. Recently, soft robots have received high attention for the variety of medical, industrial, agricultural applications [1]. There are many production lines that soft actuators are integrated to optimize and increase the productivity such as food and beverage industry, pharmaceutical industry, electronics industry,... They offer several unique benefits, from executing complex ☞

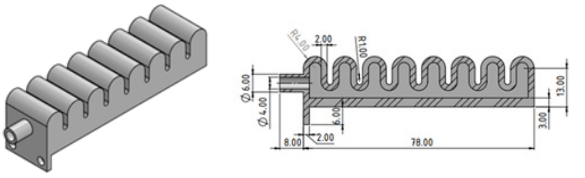
and delicate actions to facilitating processes with specific standards and operating effectively in harsh environments.

Nowadays, the traditional way for fabricating a soft actuator is casting and forming [4]. Despite the fact that it is widely used in mass production, there are many drawbacks of molding that lead to the actuators' limitation of applications. One disadvantage stands out is the number of processes needs to be conduct to fabricate a single actuator, which leads to significant time-consuming, inaccuracy, inefficiency and inability to manufacture soft actuators in a streamlined manner. Other disadvantages are common errors that occur in the molding and forming processes.To address the drawbacks of the traditional manufacturing process, this article makes the following contributions: determines the 3D-printing parameters to fabricate the soft actuator by FDM, fabricates the soft actuator with thermoplastic elastomer, simulates the bending behaviors of the soft actuator, examine the ability of the printing soft actuator in an automative production line.

2. DESIGN AND FABRICATION

2.1. Design the soft actuator

We can categorize soft gripping in three technologies: by actuation, by controlled stiffness, and by controlled adhesion [5]. To design a soft actuator, it is crucial to choose a technology or a combination of two technologies as a guideline for the inner structure design. In this research, the technology must be beneficial for fabrication, assembly under current working conditions and the mechanical properties is optimized based on the chosen material. In this paper, the Soft Pneumatic Actuators (SPAs), which was driven by applying pressure to the inner walls of cavities and had many cavities connected by channels, was chosen. By changing the applied pressure, the soft actuator can perform contracting [6], rotary [7], and bending [8] motions upon pressurization. Figure (1) shows the general shape of the soft actuator.



(a) *(b)*

Figure 1. A pneumatic soft actuator: (a) General shape; (b) Geometrical parameters

2.2. Fabricate the soft actuator

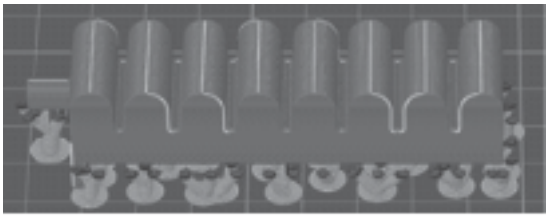
The material used for printing was eSUN eTPU-95A whose mechanical properties are shown in Table 1. The 3D printing machine was a Bambu Lab A1, and the slicer used was Bambu Studio. The printing environment needed to be ventilated without significant airflow to maintain proper heat at the nozzle and ensure the stability of the material flow.

Table 1. eSUN eTPU-95A properties

eSUN eTPU-95A	
	Typical value
Physical Properties	
Density	1.21 g/cm^3
Melt Flow Index	1.2 (190°C/2.16kg)
Mechanical Properties	
Tensile Strength	35 MPa
Elongation at Break	≥800%

The printing orientation was optimized to reduce support structures and overhang. The

actuator was printed sideways [9] as there were a few advantages over printing bellows pointing upwards. The printing orientations of the soft actuator were shown in Figure 2.



(a)



(b)

Figure 2. Printing orientation: (a) Bellow pointing upward; (b) Sideway

According to the properties of the eSUN eTPU-95A, the printer settings were optimized after printing a number of TPU specimens and evaluating the quality and the quantity of the successfully printed parts. The final printer settings were illustrated in Table 2.

Table 2. Printer settings for eSUN eTPU-95A

Parameter	**Setting**
Quality	
Layer height	0.12 mm
Initial layer height	0.2 mm
Line width	
Default	0.42 mm
Initial layer	0.5 mm
Inner wall	0.45 mm
Sparse infill	0.45 mm
Strength	
Walls	
Wall loops	4
Top/Bottom shell layers	11
Sparse infill	
Sparse infill density	100%
Sparse infill pattern	Rectilinear
Speed	
Initial layer	30 mm/s
Initial layer infill	40 mm/s
Outer/Inner wall	40 mm/s
Sparse infill	40 mm/s
Support	
Type	Tree
Style	Default
Parameter	Setting

After printing, no post-processing was required and a pneumatic tube was inserted directly to the hole and by using AB glue, the tube was connected tightly to the actuator. The final printed model was shown in Figure 3.

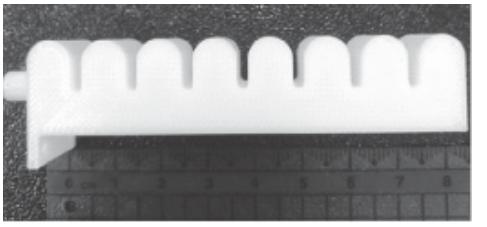
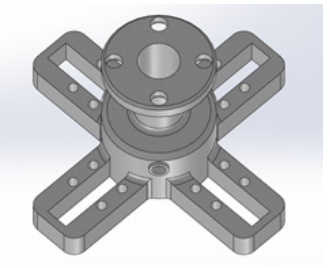


Figure 3. The printed soft actuator

When designing the fixture for the soft actuator, a cavity was integrated to optimize its internal structure and functionality. Additionally, there were tubes directly inserted into the fixtures to route air from the fixture to actuators. Moreover, to adjust the working zone of the actuator, the process was simplified by fastening the bolts at the predefined positions. This fixture was cost-effective, highly flexible, and easy to operate, which helped reduce manufacturing cost and increase the versatility. The model of the soft actuator was shown in Figure 4. ☞



(a)



(b)

Figure 4. The soft actuator fixture: (a) The designed model; (b) The fabricated fixture

2.3. Modeling the soft actuator

In this work, the finite element method is used as a mathematical tool employed to test and simulate soft grippers behaviors before the fabrication process. The software is ABAQUS/CAE (Simulia, Dassault Systems). The pressure was directly applied to all the internal walls of the internal cavities of the soft actuator as an external load with maximum applied pressure as 0.7 MPa. ENCASTRE boundary condition was applied to the fixed end of the actuator. In meshing process, all the components of the actuator were modelled by using solid 10-node quadratic tetrahedron hybrid elements (Abaqus element type C3D10H) [10]. The bending behaviors of the soft actuator under air pressurization obtained with the FEM models and at the real test are illustrated in Figure 5.

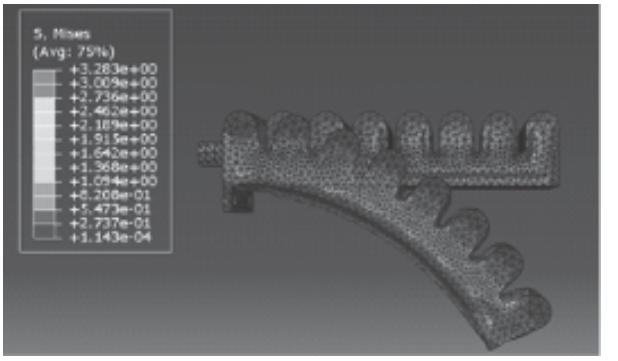


Figure 5. FE-simulated bending behavior of the soft actuator

3. RESULTS AND ANALYSIS

3.1. Bending experiment

The characteristic of the printed soft actuator was to bend when pressure was applied to the inner walls. The experiment model (Figure 6) was designed with the same elements as the simulation. Previously, the simulation was conducted on Abaqus/CAE, with the cavities in the actuator being subjected to a pressure range from 0.1 MPa to 0.7 MPa. 0.7 MPa wass the maximum pressure applied to the printed model by the pump. The relationship between the applied pressure and the bending angle is presented in Figure 7.

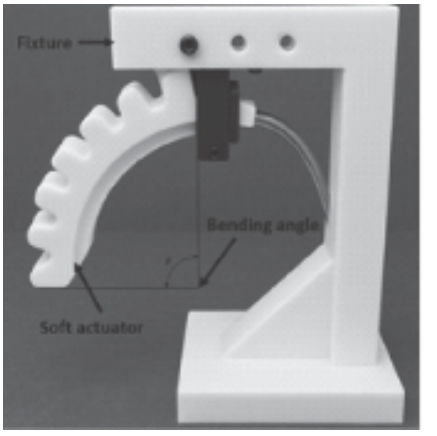


Figure 6. Bending behaviours of the soft actuator at 0.7MPa

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 329, tháng 6 năm 2025
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

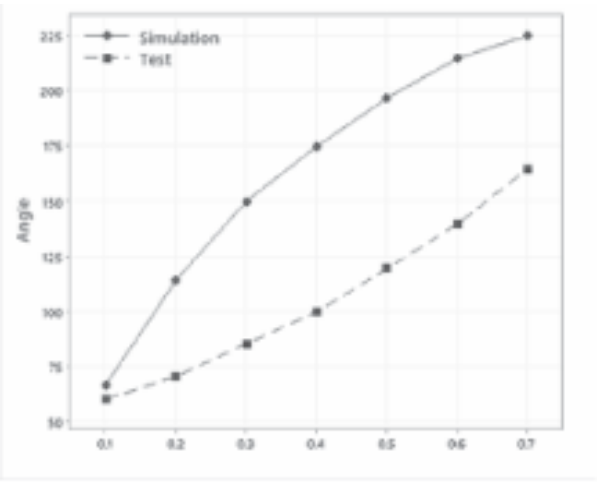


Figure 7. Bending angle and the applied pressure relationship of experimental and FE-simulated

Overall, the differences between the simulation and the experiment exceeded 5% across all pressure values. Firstly, the lowest experimental bending angle of the soft actuator was 60.52°, which was lower than the simulated angle of 66.76°. Secondly, at the maximum pressure of 0.7 MPa, the simulation angle was 224.86° and the experimental angle was 164.63°. The difference was attributed to the quality of the printed soft actuator, as the drawback of 3D printing was the occurrence of leakage between printing layers.

3.2. Grasping experiment

To examine the working ability of the soft actuator, a test was designed for the soft gripper to grasp and hold objects while moving. The soft actuator was fixed to a robotic arm that was programmed to perform a combination of movements. The simulation could verify whether the soft actuator was capable of performing the grasping motion timely and adapting the requirements of the production line.

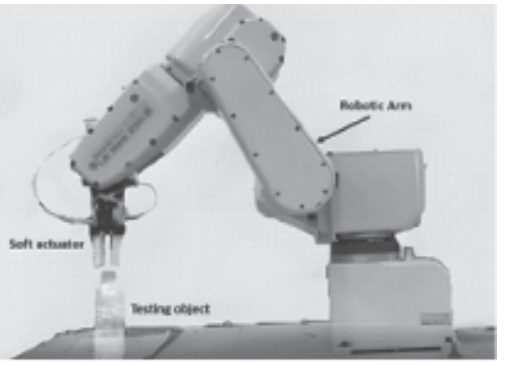


Figure 8. The soft actuator connected to the robotic arm

The objects were categorized into 4 types: convex, non-convex, flat and deformable. In this research, it is crucial to observe whether the gripped objects were lifted and retained the original shape under the gripping force exerted by the soft actuator. The gripping of the soft actuator on the testing object relied on the force applied to the contact surface or the complete placement of the object within the soft actuator's working zone. Considering the object's deformation, a successful gripping test required the object to be lifted without any distortion, as the advantage of the soft actuator lies in its ability to perform delicate actions with fragile objects. The gripping test is shown in Figure 9.

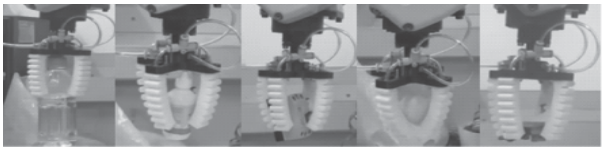


Figure 9. The gripping test with different objects

The experiment results showed that the soft actuator was highly advantageous to convex and non-convex objects. Objects with smooth surfaces were challenging to grip securely from the starting position. Additionally, a piece of clay was chosen as the deformable object. The outcome was similar to that of convex and non- ☞

convex objects, but due to the deformation of it, the test was deemed a failure. On the other hand, the flat objects in this research were an acrylic sheet and a paper and the soft actuator failed to grip both objects.

Additionally, to assess the maximum payload at the maximum applied pressure at 0.7MPa, a 350ml bottle of water was used as the testing specimen. By adding more water, the weight was increased from 50g to 350g. The experiment showed the maximum payload was approximately 330g with the testing object was convex. The result of the experiment was presented in Table 3.

Table 3. Experimental weight and result

Weight (g)	30	50	100	150	200	250	300	330	350
Result	Success								Fail

4. CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper, a method for fabricating soft grippers using 3D printing is presented. The 3D printing parameters are determined experimentally by producing printed samples with different parameter settings. After the experiments, a set of parameters is proposed that can be applied to the fabrication of similar soft grippers using the same TPU material. To verify the mechanical properties of the 3D-printed soft gripper, finite element analysis is conducted using Abaqus/CAE. Subsequently, bending tests of the soft gripper are performed under different force values and compared with a hyperelastic model to evaluate the quality of the printed product. To assess the applicability of the soft gripper in a production line, tests are carried out to evaluate its ability to grip objects of various shapes and weights.

Acknowledgement:

This research is funded by Ho Chi Minh City University of Technology – Vietnam National University Ho Chi Minh City (HCMUT – VNU-HCM) under the project code SVKSTN-2024-CK-22. The research team sincerely thanks Ho Chi Minh City University of Technology – Vietnam National University Ho Chi Minh City for supporting the implementation of this research. ❖

References:

[1]. Y. Liu et al., "*Intelligent soft robotic grippers for agricultural and food product handling: A brief review with a focus on design and control*". Adv. Mater., vol. 5, no. 12, 2023, doi: 10.1002/aisy.202300233.

[2]. X. Dong et al., "*Recent advances in biomimetic soft robotics: fabrication approaches, driven strategies and applications*". Soft Matter, vol. 18, pp. 7699-7734, 2022, doi: 10.1039/d2sm01067d.

[3]. J. Wan et al., "*Design and applications of soft actuators based on digital light processing (DLP) 3D printing*". IEEE Access, vol. 11, pp. 86227-86242, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3302920.

[4]. C. D. Onal and D. Rus, "*A modular approach to soft robots*". In Proc. 4th IEEE RAS & EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatron. (BioRob), Rome, Italy, 2012, pp. 1038-1045, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290290.

[5]. J. Shintake et al., "*Soft robotic grippers*". Adv. Mater., vol. 30, no. 29, 2018, doi: 10.1002/adma.201707035.

[6]. B. Tondu and P. Lopez, "*Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators*". IEEE Control Syst. Mag., vol. 20, no. 2, pp. 15-38, Apr. 2000, doi: 10.1109/37.833638.

[7]. T. Noritsugu et al., "*Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicone rubber*". J. Robot. Mechatron., vol. 13, no. 1, pp. 17-22, 2001, doi: 10.20965/jrm.2001.p0017.

[8]. Z. Sun et al., "*Design of wearable hand rehabilitation glove with soft hoop-reinforced pneumatic actuator*". J. Cent. South Univ., vol. 26, pp. 106-119, 2019, doi: 10.1007/s11771-019-3986-x.

[9]. H. K. Yap et al., "*High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications*". Soft Robot., vol. 3, no. 3, pp. 144-158, 2016, doi: 10.1089/soro.2016.0030.

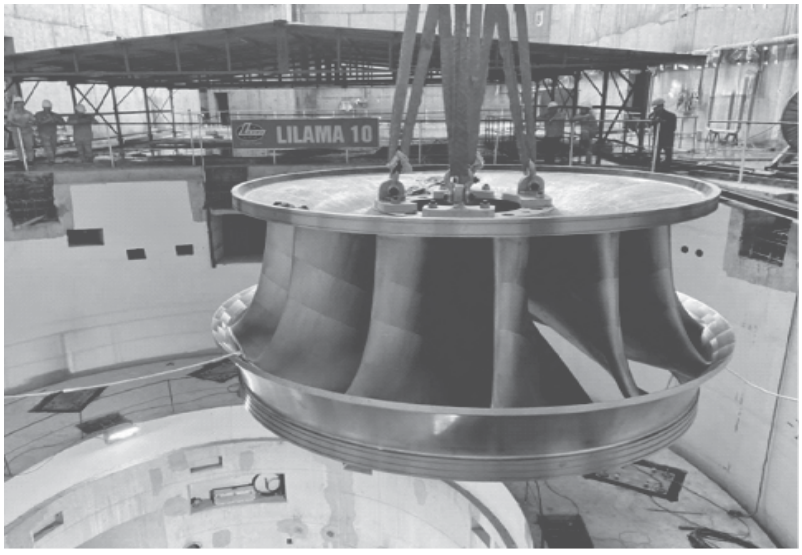
[10]. J. Lei et al., "*Design and manufacture of a flexible pneumatic soft gripper*". Appl. Sci., vol. 12, no. 6306,

LILAMA 10 – Ghi dấu ấn quan trọng tại dự án Thủy điện Hòa Bình mở rộng

Ngày 23 tháng 05 năm 2025, Công ty Cổ phần LILAMA 10 đã ghi dấu ấn quan trọng khi lắp đặt thành công bánh xe công tác nặng 110 tấn cho tổ máy số 1 tại dự án Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng. Đây là một trong những cột mốc kỹ thuật quan trọng, đánh dấu bước tiến mới trong quá trình lắp đặt thiết bị của dự án.

Bánh xe công tác có trọng lượng 110 tấn, là thiết bị siêu trọng, được nhập khẩu từ nước ngoài. Việc lắp đặt bánh xe công tác do nhà thầu LILAMA 10 thực hiện, đòi hỏi sự phối hợp chính xác và an toàn tuyệt đối giữa các bên liên quan.

Ông Lê Văn Đông - Giám đốc dự án LILAMA 10 tại thuỷ điện Hoà Bình mở rộng cho biết: việc hoàn thành lắp đặt bánh xe công tác là điều kiện tiên quyết để tiếp tục triển khai lắp đặt thiết bị quan trọng tiếp theo như nắp hầm tuabin, trục tuabin, vành điều khiển, ổ hướng tuabin... Đây cũng là bước chuẩn bị cần thiết cho việc tổ hợp rotor tổ máy số 1, dự kiến hoàn thành trong tháng 6/2025.



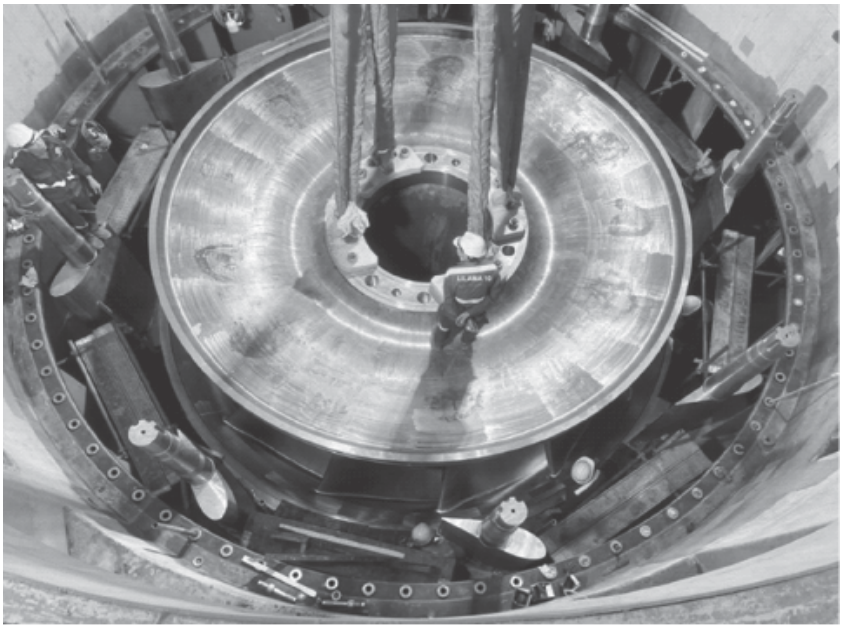
Việc hoàn thành lắp đặt bánh xe công tác là điều kiện tiên quyết để tiếp tục triển khai lắp đặt thiết bị quan trọng tiếp theo.

Dự án Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng là một trong những công trình trọng điểm quốc gia, với tổng mức đầu tư hơn 9.200 tỷ đồng, do Tập đoàn Điện lực Việt Nam (EVN) làm chủ đầu tư và Ban Quản lý dự án Điện 1 (EVNPMB1) trực tiếp quản lý điều hành. Công trình có quy mô lắp đặt 2 tổ máy với tổng công suất 480 MW, mỗi tổ máy có công suất 240 MW. Sản lượng phát điện bình quân hàng năm dự kiến khoảng 488,3 triệu kWh.

Công ty CP LILAMA 10 đảm nhận lắp đặt toàn bộ thiết bị cơ khí thuỷ công và thiết bị cơ ☞

điện. Khi đi vào vận hành, nhà máy sẽ bổ sung khoảng 500 triệu kWh điện mỗi năm cho hệ thống điện quốc gia, góp phần nâng cao khả năng khai thác công suất phủ đỉnh, tăng cường độ an toàn, ổn định và hiệu quả vận hành hệ thống điện quốc gia.

Thành công này không chỉ thể hiện năng lực kỹ thuật và khả năng quản lý dự án của LILAMA 10 mà còn khẳng định sự cam kết mạnh mẽ của Công ty đối với việc thực hiện những dự án quy mô lớn và phức tạp. Điều này giúp nâng cao uy tín của LILAMA 10 trong ngành xây dựng cơ điện và thủy điện tại Việt Nam cũng như trên thế giới.



LILAMA 10 đã ghi dấu ấn quan trọng khi lắp đặt thành công bánh xe công tác nặng 110 tấn cho tổ máy số 1 tại dự án Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng.

Tính đến thời điểm tháng 5/2025, Dự án Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng đã hoàn thành hơn 80% khối lượng xây dựng và lắp đặt thiết bị. Chủ đầu tư EVN, EVNPMB1, LILAMA 10 và các nhà thầu đang nỗ lực bám sát tiến độ, phấn đấu đưa tổ máy số 1 phát điện trước ngày 2/9/2025 và hoàn thành toàn bộ dự án trong năm 2025.

Với phương châm "An toàn – Chất lượng – Tiến độ", LILAMA 10 tiếp tục khẳng định vị thế là đơn vị thi công chủ chốt trong nhiều dự án trọng điểm quốc gia, không ngừng cải tiến và áp dụng những công nghệ tiên tiến, mang lại hiệu quả cao nhất cho các công trình.

LILAMA 10 cam kết tiếp tục phát huy năng lực và tinh thần làm việc đầy trách nhiệm để đóng góp vào sự phát triển bền vững của ngành năng lượng nước nhà. Thành công trong việc lắp đặt bánh xe công tác nặng 110 tấn chỉ là một trong những bước tiến mạnh mẽ mà LILAMA 10 đã và đang thực hiện, hướng tới mục tiêu trở thành đơn vị hàng đầu trong lĩnh vực lắp máy.❖

PV