

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 đồng bào 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 sinh, học viên cao học, ... trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam (bản in giấy), gồm: ¹Cơ khí Chế tạo máy, ²Cơ khí Quốc phòng, ³Cơ khí Giao thông, ⁴Cơ khí Nông-lâm nghiệp, ⁵Cơ khí Xây dựng, ⁶Cơ khí Thủy sản, ⁷Cơ khí Địa chất, ⁸Cơ khí Hóa chất, ⁹Cơ khí Bảo quản chế biến nông lâm thủy sản, ¹⁰Cơ khí Động cơ đốt trong, ¹¹Cơ khí Ô tô - Máy kéo, ¹²Cơ khí Máy thủy khí, ¹³Cơ khí Công nghệ nhiệt lạnh, ¹⁴Cơ khí máy năng lượng, ¹⁵Cơ khí Công nghệ dệt, ¹⁶Cơ khí Công nghệ cắt may, ¹⁷Cơ khí Cơ-điện tử, ¹⁸Cơ khí Kỹ thuật hệ thống công nghiệp, ¹⁹Cơ 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 dẫn 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 ký 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), P. Phú Diễn, TP. Hà Nội

Điện thoại: (024) 37 920 650 - 0985 696 263 / 0982 254 465

Email: Teckvn.bbkh@gmail.com * **Website:** cokhivietnam.vn

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)

TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 331, tháng 8 năm 2025
cokhivietnam.vn

TỔNG BIÊN TẬP
HÀ DUY KHÁNH

PHÓ TỔNG BIÊN TẬP
ĐẶNG VĂN LONG

HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP

TS. **ĐỖ HỮU HẢO** (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 VĂN HƯNG**
PGS,TS. **ĐÀO QUANG KẾ**
PGS,TS. **NGUYỄN VĂN BẦY**
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 BÌNH**
PhD. **MIKE PHÙNG**

THIẾT KẾ MỸ THUẬT
NGÂN GIANG

*Tập chí Cơ khí Việt Nam:

- In tại Công ty Cổ phần In Khoa học Công nghệ Hà Nội
- Khung khổ 20,5cm x 28,5cm
- 396 trang
- Xuất bản mỗi tháng một kỳ
- Giá bán 120.000 đồng/quyển Tập chí

TẠP CHÍ

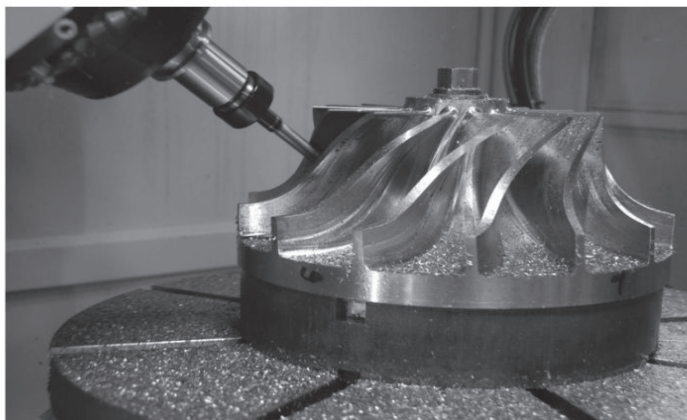


ISSN 2615 - 9910 (bản in)
ISSN 2815 - 5505 (online)

CƠ KHÍ
VIỆT NAM
VIETNAM MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL

CƠ QUAN CỦA TỔNG HỘI CƠ KHÍ VIỆT NAM

• <http://cokhivietnam.vn>



- ❖ Thiết kế khuôn phun ép cho mẫu composite có đùng carbon fiber dạng tấm
- ❖ Nghiên cứu tính toán hiệu suất của loa giảm giạt trên súng đại liên SDL-M24
- ❖ Phân tích ứng dụng hệ thống truyền động khí nén trong lĩnh vực cơ điện tử

Số 331, tháng 8 năm 2025

Tạp chí Cơ khí Việt Nam phát hành ngày 25 tháng 8 năm 2025

TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM

Số 4 Phạm Văn Đồng (trong Viện Nghiên cứu Cơ khí), P. Phú Diễn, TP. Hà Nội

Điện thoại: (024) 3792 0650 **Hotline:** 0985 696 263 - 0982 254 465

Email: tckvietnam@gmail.com

Website: cokhivietnam.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 1297/BC-QLBC ngày 13 tháng 8 năm 2025 của Cục Báo chí,
Bộ Văn hóa, Thể thao và Du lịch để xuất bản số 331 tháng 8 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 Bào, phường Hạnh Thông,
TP. Hồ Chí Minh
Điện thoại: 0913 921 407
Email: tckvietnam@gmail.com

2. Tại tỉnh Quảng Ninh:

- TS. **Hoàng Minh Thuận**
Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng,
Số 54, khu Liên Phương, phường Yên Tử,
tỉnh Quảng Ninh
Điện thoại: 0904 116 189
Email: minhthuan.tckvni@gmail.com

3. Tại Thái Nguyên:

- GS,TS. **Vũ Ngọc Pi**
Số 234 tổ Phú Xá 5, phường Tích Lương,
tỉnh Thái Nguyên
Điện thoại: 0974 905 578
Email: vungocpi@tnut.edu.vn

- 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 Diễn Hồng,
TP. Hồ Chí Minh.
Điện thoại: 0913 603 264
Email: nhloc@hcmut.edu.vn

Phòng viên thường trú:

1. Tại Hải Phòng:

- Lê Thế Hiệp
Điện thoại: 0913 063 747
Email: daidientck@gmail.com

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)

TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 331, tháng 8 năm 2025

cokhivietnam.vn

NGHIÊN CỨU – TRAO ĐỔI (8 – 389)

1. TS. Trương Công Tiễn , TS. Lê Văn An : Đánh giá độ bền uốn của ống composite bằng lý thuyết phá hủy Tsai-Wu và phương pháp phần tử hữu hạn 3D.....	8
2. TS. Lê Văn An , TS. Trương Công Tiễn : Mô hình hóa hư hỏng theo tiêu chuẩn Hashin của vật liệu tấm hybrid metal/CFRP/metal chịu tải uốn 3 điểm trong môi trường phần tử hữu hạn.....	14
3. ThS. Dương Lê Hùng , ThS. Bùi Chấn Thạnh : Tối ưu hóa hướng sợi bằng phương pháp số nhằm nâng cao độ bền uốn của tấm hybrid kim loại/CFRP/kim loại.....	21
4. ThS. Bùi Chấn Thạnh , ThS. Dương Lê Hùng : Nghiên cứu số trạng thái uốn 4 điểm tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) sử dụng tiêu chí phá hủy Hashin.....	28
5. Nguyễn Minh Trí : Ứng dụng bộ điều khiển PID cải tiến kết hợp học lặp cho hệ truyền động quay cơ điện thủy lực.....	35
6. Nguyễn Trương Trường Giang , Nguyễn Ngọc Phương , Trần Thanh Thuởng , Trần Thanh Lam : Thực nghiệm độ bền kéo của mẫu kim loại ép nhiệt.....	41
7. Bùi Thanh Chí Khang , Hồ Ngọc Bốn , Nguyễn Ngọc Phương , Đỗ Văn Đại : Nghiên cứu thiết kế mô hình 3D hàn ống tự động.....	49
8. Bùi Minh Luân , Nguyễn Văn Tú , Huỳnh Đỗ Song Toàn , Vũ Quang Huy : Thiết kế máy uốn ống.....	58
9. Hoàng Trung Kiên , Dương Đăng Danh , Đỗ Văn Hiến , Đỗ Văn Đại : Thiết kế cơ cấu xoay ống cho quá trình tạo ống.....	65
10. Trần Công Hiếu , Nguyễn Hải Hoàn , Đỗ Văn Hiến , Nguyễn Quang Sáng : Thiết kế module đẩy ống cho máy uốn.....	73
11. Phan Hữu Hoàng Ninh , Nguyễn Trọng Hiếu , Trần Quốc Hùng , Nguyễn Trà Kim Quyên : Thiết kế mô hình tạo hình mặt cong bằng phương pháp chấn.....	81
12. Lê Đình Nguyên Huy , Phan Thanh Nhân , Lê Thanh Tùng , Nguyễn Hà : Nghiên cứu chế tạo các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm bằng phương pháp in 3D kim loại không bù vật liệu.....	89
13. Huỳnh Trần Minh Chiến , Âu Thị Kim Loan , Hoàng Trọng Nghĩa , Tạ Nguyễn Minh Đức : Thiết kế và chế tạo mẫu thử độ bền kéo của kết cấu dạng lattice.....	98
14. Nguyễn Gia Hưng , Âu Thị Kim Loan , Hoàng Trọng Nghĩa , Tạ Nguyễn Minh Đức : Thử nghiệm độ bền chi tiết chịu biến dạng uốn với các kết cấu dạng lattice.....	107
15. Hoàng Lê Mạnh Tiệp , Nguyễn Đức Tôn , Phạm Quân Anh , Nguyễn Hải Hoàn : Ứng dụng ANSYS CFX trong phân tích phân bố nhiệt độ lòng khuôn âm.....	115
16. Lê Nguyễn Liêm , Trần Ngọc Hào , Âu Thị Kim Loan , Trần Thanh Thuởng : Mô phỏng phân bố nhiệt của lòng khuôn dương khi dùng hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Cooling Layer)...	122
17. Phạm Anh Tú , Võ Minh Tâm : Thiết kế khuôn phun ép cho mẫu composite có dùng carbon fiber dạng tấm.....	129
18. Bành Quốc Nguyên , Trương Phát Đạt : Nghiên cứu tối ưu hóa sản phẩm phun ép nhựa có hỗ trợ nước bằng phần mềm Moldex3D.....	138
19. Phạm Văn Tuấn , Lê Thanh Bình , Lê Xuân Hùng , Trần Đức Việt , Mai Đình Sĩ , Đinh Hoàng Thụy , Trần Văn Nhị , Bùi Quang Toàn : Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo hệ thống giá súng máy 12,7 mm đa năng kiểu bệ quay.....	144
20. ThS. Nguyễn Thị Thu Hường : Tổng quan ứng dụng công nghệ nano trong dệt may.....	148

21. Nguyễn Văn Cảnh, Ngô Quang Tú: Điều khiển vận tốc in tự thích nghi theo hình học nhằm nâng cao độ chính xác bề mặt trong in 3D FDM.....	155
22. Nguyễn Thanh Tùng: Phân tích uốn tĩnh của tấm composite nhiều lớp trên nền đàn hồi	161
23. Cao Hoàng Thông, Trần Thanh Thương, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy: Ứng dụng ANSYS trong phân tích kết quả gia nhiệt bằng khí cho lòng khuôn phun ép nhựa.....	168
24. Lê Thái Sơn, Nguyễn Hữu Ngoạn: Thiết kế, chế tạo thiết bị gia công lỗ tâm, phục vụ gia công chi tiết dạng trục.....	178
25. Hoàng Thị Kim Dung: Nghiên cứu đặc tính khí động máy bay hai chỗ ngồi.....	182
26. Phạm Trung Kiên, Nguyễn Minh Tiến: Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo giá thử nghiệm động cơ khởi động trên xe xích quân sự hạng trung.....	186
27. Lê Thái Sơn, Lê Phú Cường: Đánh giá chất lượng môi hàn khi hàn ma sát khuấy có hỗ trợ điện áp.....	191
28. Vũ Ngọc Phúc, Bùi Như Nghĩa, Đặng Thái Việt: Chiến lược dẫn đường rô bốt dạng bánh dựa trên giải thuật BIT* và phương pháp học tăng cường.....	196
29. ThS. Nguyễn Thái Sơn, PGS,TS. Nguyễn Chí Sáng, PGS,TS. Trần Ngọc Hiền: Nghiên cứu mô phỏng phân bố nhiệt trong công nghệ sản xuất bồi đắp.....	202
30. Hoàng Xuân Lâm: Ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) trong dự đoán ảnh hưởng của lượng chạy dao và tốc độ trục chính đến độ nhám bề mặt khi gia công biên dạng 3D vật liệu nhôm 7075-T6 bằng dao phay cầu trên máy phay CNC.....	209
31. Bùi Mạnh Cường, Dương Thế Tuấn Anh, Nguyễn Bích Ngọc, Vương Anh Tuấn, Phan Văn Trường, Thân Đình Thực, Đặng Minh Chiến, Đỗ Văn Sĩ: So sánh khả năng chống mài mòn của lớp phủ plasma điện phân và lớp mạ crôm trên nền thép dựa trên thực nghiệm.....	215
32. Nguyễn Văn Bình Dương, Phan Hoàng Long, Nguyễn Huy Hùng, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến: Thiết kế cơ cấu truyền động vây dựa trên cơ cấu bốn khâu không gian....	222
33. Nguyễn Văn Bình Dương, Phan Hoàng Long, Nguyễn Huy Hùng, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến: Thiết kế và phân tích động lực học cụm màng vây mềm cho robot bơi phỏng sinh học sử dụng chuyển động MPF.....	228
34. Nguyễn Công Nguyên, Lê Thanh Sơn, Phan Hoàng Long, Ngô Nguyên Hồng, Nguyễn Tấn Tiến: Thiết kế và chế tạo máy cuộn lục bình MCLB-2.....	235
35. Phan Hoàng Long, Nguyễn Huy Hùng, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến: Thiết kế robot bốc xếp kho đặc chủng dùng tay giãn dài và băng tải mô-đun.....	240
36. Vũ Viết Toàn, Lê Thanh Sơn, Phan Hoàng Long, Nguyễn Tấn Tiến: Nghiên cứu cải tiến thiết kế silo chứa nông sản ứng dụng công nghệ bảo quản lạnh.....	247
37. Vũ Viết Toàn, Lê Thanh Sơn, Phan Hoàng Long, Nguyễn Tấn Tiến: Nghiên cứu bảo quản lúa bằng phương pháp thông thoáng lạnh.....	253
38. Hồ Lê Khánh Dý, Nguyễn Hữu Cường Thịnh, Phan Hoàng Long, Nguyễn Tấn Tiến: Thiết kế bộ điều khiển PID và MRAC cho hệ thống waterjet trong USVs cứu hộ.....	259
39. KS. Nguyễn Hoàng Phú, ThS. Mai Văn An, ThS. Tạ Bá Dũng: Nghiên cứu tính toán hiệu suất của loa giảm giạt trên súng đại liên SDL-M24.....	265
40. Phùng Tuấn Anh, Trần Văn Chiến, Nguyễn Trường An, Bùi Công Đoài: Khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ tôi cận tới hạn và nhiệt độ ram đến cơ tính và tổ chức tế vi của thép hợp kim thấp 30CrMnSi chế tạo từ sắt xốp.....	270
41. ThS. Bùi Ánh Hưng: Khảo sát vật liệu có bề dày không đồng nhất để tính toán liều chiếu trong quá trình kiểm tra mỗi hàn.....	278
42. Nguyễn Anh Tuấn, Nguyễn Quang Dũng, Nguyễn Văn Khiết: Nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy in 3D resin theo công nghệ LCD.....	283

43. TS. Nguyễn Duy Anh , ThS. Nguyễn Thị Hiếu Thảo : Nghiên cứu tối ưu kiến trúc mạng nơ ron với thuật toán di truyền NSGA-II, ứng dụng trong bài toán dự đoán độ nhám bề mặt sau khi tiện CNC với thép SUM24L.....	291
44. ThS. Nguyễn Tiến Dũng : Ứng dụng thực nghiệm để đánh giá khuyết tật mối hàn thân, vỏ tàu thủy bằng phương pháp siêu âm.....	299
45. Nguyễn Như Hiếu, Phạm Ngọc Chung : Đồng bộ hóa đồng nhất của hệ siêu hỗn loạn bốn chiều sử dụng cách tiếp cận hàm năng lượng Hamiltonian.....	304
46. Phạm Ngọc Chung, Nguyễn Như Hiếu : Một tiêu chuẩn sai số bậc cao tìm nghiệm xấp xỉ cho tần số dao động tự do của hệ phi tuyến có chứa đạo hàm cấp ba.....	311
47. ThS. Hà Trung Tự : Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ đến độ bền mỏi động cơ phóng tên lửa A87.....	318
48. TS. Nguyễn Minh Thắng : Nghiên cứu và mô phỏng kiểm tra độ bền ô tô trong trường hợp va chạm xiên bằng phương pháp phần tử hữu hạn.....	322
49. Trần Văn Mạnh : Phân tích giải pháp tối ưu hóa công suất của bộ thu hồi năng lượng piezoelectric xếp lớp tích hợp trên hệ thống treo ô tô.....	329
50. Nguyễn Tiến Dũng : Phân tích ứng dụng hệ thống truyền động khí nén trong lĩnh vực cơ điện tử.....	334
51. Trần Văn Mạnh : Tiềm năng sử dụng nano graphene cải thiện hiệu quả làm việc trong dây chuyền tự động hóa sản xuất ô tô.....	338
52. Trần Quang Phước : Nghiên cứu phát hiện lỗi cho sản phẩm thân nhựa cầu lông dựa trên kỹ thuật Unwarpping.....	344
53. TS. Bùi Văn Phương , TS. Mai Văn Tú , TS. Phạm Quang Hiếu , NCS. Bùi Anh Thúc : Nghiên cứu, thiết kế, chế thử liềm phóng động cơ hành trình nhiên liệu rắn cho tên lửa chống tăng.....	352
54. Thái Hoàng Tuyết Nhi, Nguyễn Văn Thành, Dương Công Châu : Ứng dụng mô hình quyết định đa tiêu chí trong lựa chọn công nghệ tái chế chất thải điện tử.....	358
55. Nguyễn Viết Tịnh, Nguyễn Văn Thành, Nguyễn Văn Thuận : Ứng dụng phương pháp CRITIC và TOPSIS trong việc lựa chọn thủy điện xây dựng nhà máy năng lượng mặt trời nổi.....	365
56. Trương Minh Hiếu, Trần Nguyên Duy Phương, Trương Quốc Thanh, Nguyễn Văn Thành, Võ Ngọc Cường : Thiết kế thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng chi dưới cho bệnh nhân sau đột quỵ não.....	372
57. Tien Dung Nguyen, Ngoc Thai Huynh, Hoang Trong Tran Huy : Hydrodynamic and aerodynamic analysis of offshore wind turbine foundation model using finite element method.....	377
58. Pham Ngoc Thanh, Phung Xuan Son : Vibroacoustic behavior of a clamped double-composite plate filled with an air cavity in thermal environment.....	383

DOANH NGHIỆP – DOANH NHÂN (390 – 392)

- LILAMA 10 tiếp tục khẳng định bản lĩnh và năng lực tại Dự án Thủy điện Hòa Bình mở rộng.....	390
--	-----

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 331, THÁNG 8 NĂM 2025

TT	HỌC HÀM, HỌC VỊ; HỌ VÀ TÊN	ĐƠN VỊ CÔNG TÁC
1	PGS,TS. Nguyễn Tuấn Linh	Trường Cơ khí – Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
2	TS. Phạm Minh Hiếu	
3	TS. Nguyễn Văn Luật	
4	PGS,TS. Phan Nguyễn Kỳ Phúc	Trường Đại học Quốc tế, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
5	PGS,TS. Lưu Thanh Tùng	Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
6	PGS,TS. Võ Tường Quân	
7	TS. Phùng Thanh Huy	
8	TS. Trần Quang Phước	
9	TS. Nguyễn Đức Duy	
10	PGS,TS. Trương Tất Dích	Trường Đại học Giao thông vận tải
11	TS. Nguyễn Tùng Lâm	
12	PGS,TS. Lê Thị Thái	Đại học Bách Khoa Hà Nội
13	TS. Nguyễn Anh Dũng	Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
14	TS. Lương Hữu Phước	Khoa Vật lý Kỹ thuật, Đại học Bách Khoa Hà Nội
15	PGS,TS. Hà Minh Hùng	Viện Phát triển Kỹ thuật, Công nghệ tiên tiến (IDAT)
16	PGS,TS. Lê Văn Sỹ	Tổng Công ty Bảo dưỡng – Sửa chữa Công trình dầu khí
17	PGS,TS. Đỗ Văn Thơm	Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự
18	PGS,TS. Đoàn Trắc Luật	
19	TS. Lại Đăng Giang	

20	PGS,TS. Lê Văn Tạo	Trung tâm Công nghệ, Học viện Kỹ thuật quân sự
21	TS. Đỗ Tiến Lập	
22	TS. Đàm Việt Phương	Khoa Hàng không Vũ trụ, Học viện Kỹ thuật quân sự
23	TS. Nguyễn Thế Dũng	
24	TS. Võ Văn Biên	Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự
25	PGS,TS. Phạm Sơn Minh	Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
26	TS. Đặng Hùng Sơn	
27	PGS,TS. Nguyễn Hữu Thọ	Trường Đại học Nguyễn Tất Thành
28	TS. Nguyễn Minh Trí	
29	TS. Trương Công Tiến	
30	TS. Trần Văn Hoàng	Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
31	TS. Nguyễn Tường Vi	
32	TS. Nguyễn Hữu Cường	Trường Đại học Cần Thơ
33	TS. Đồng Phạm Khôi	Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga, Bộ Quốc phòng
34	TS. Hoàng Ngự Huân	Trường Đại học Mở – Địa chất
35	TS. Bùi Thị Thúy	
36	TS. Phạm Tuấn Cường	
37	TS. Đinh Công Đạt	
38	TS. Ngô Văn Thanh	Trường Đại học Điện lực
39	TS. Đào Văn Dưỡng	Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

ĐÁNH GIÁ ĐỘ BỀN UỐN CỦA ỐNG COMPOSITE BẰNG LÝ THUYẾT PHÁ HỦY TSAI-WU VÀ PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN 3D

ASSESSMENT OF BENDING STRENGTH OF COMPOSITE TUBES VIA TSAI-WU
FAILURE THEORY AND 3D FEM

TS. Trương Công Tiến, TS. Lê Văn An

Khoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Email: tctien@ntt.edu.vn;

lvana@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này phân tích khả năng chịu uốn ba điểm của ống composite ba lớp sợi carbon đan lưới (Carbon Fiber 3K-240g) với nhựa HDPE làm chất kết dính, áp dụng tiêu chuẩn phá hủy Tsai-Wu 3D để đánh giá độ bền vật liệu. Mục tiêu là xác định giới hạn bền, kiểm chứng độ chính xác của mô hình Tsai-Wu 3D và đề xuất cải tiến thiết kế nhằm nâng cao độ bền. Phương pháp thực hiện mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS để phân tích ứng suất, cơ chế phá hủy. Vật liệu ống có đặc tính cơ học cao: mô đun đàn hồi dọc $E_1 = 230$ GPa, mô đun ngang $E_2 = 15$ GPa, và cường độ kéo dọc $F_{11} = 2300$ MPa. Kết quả cho thấy nguyên nhân chính gây phá hủy là mất ổn định do uốn ngang và tách lớp do ứng suất cắt lớn. Các giải pháp cải thiện bao gồm: tăng độ dày thành ống, đổi hướng sợi từ 0° sang $\pm 45^\circ$, thay nhựa HDPE bằng epoxy hoặc nhựa nhiệt rắn, và tối ưu cấu trúc gia cường. Kết luận, tiêu chuẩn Tsai-Wu 3D là công cụ dự đoán phá hủy hiệu quả, hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế trong ứng dụng kỹ thuật.

Từ khóa: Ống composite; Tiêu chuẩn phá hủy Tsai-Wu; Thử nghiệm uốn ba điểm; Mô phỏng ANSYS FEM; Tối ưu hóa kết cấu.

ABSTRACT

This study analyzes the three-point bending resistance of a three-layer composite tube made of woven carbon fiber (Carbon Fiber 3K-240g) with HDPE resin as the matrix, using the 3D Tsai-Wu failure criterion to evaluate the material strength. The objective is to determine the strength limit, validate the accuracy of the 3D Tsai-Wu model, and propose design improvements to enhance durability. Numerical simulations were conducted using ANSYS software to analyze stress distribution and failure mechanisms. The composite tube exhibits high mechanical properties: longitudinal elastic modulus $E_1 = 230$ GPa, transverse modulus $E_2 = 15$ GPa, and longitudinal tensile strength $F_{11} = 2300$ MPa. Results indicate that the primary causes of failure are lateral buckling and delamination due to high shear stress. Proposed improvements include increasing tube wall thickness, changing fiber orientation from 0° to $\pm 45^\circ$, replacing HDPE with epoxy or thermoset resin, and optimizing the reinforcement structure. In conclusion, the 3D Tsai-Wu criterion is an effective tool for failure prediction and supports design optimization in engineering applications.

Keywords: Composite tube; Tsai-wu failure criterion; Three-point bending test; Ansys; Structural optimization.

1. GIỚI THIỆU

Ống composite 3 lớp lưới đan sợi carbon 3K-240g-Honeycomb-550k (CF-CF-CF) với nhựa HDPE làm kết dính là một vật liệu kỹ thuật cao được thiết kế để đáp ứng yêu cầu về độ bền cơ học, trọng lượng nhẹ và khả năng chống ăn mòn vượt trội. Vật liệu này được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp hàng không, ô tô, dầu khí, năng lượng và y tế, nhờ vào tỷ lệ cường độ trên trọng lượng cao, khả năng chống uốn và chống nén tốt [1]. Cấu trúc vật liệu composite gồm nhiều lớp, mỗi lớp có chức năng riêng biệt, giúp tối ưu hóa tính năng cơ học của ống [2].

Tiêu chuẩn Tsai-Wu được phát triển bởi Tsai và [3] nhằm mô tả mô hình phá hủy phi tuyến cho vật liệu composite dưới tác động của nhiều trạng thái ứng suất. Đây là một trong những tiêu chuẩn phá hủy phổ biến nhất trong công nghiệp hàng không, ô tô, dầu khí và kỹ thuật kết cấu, giúp dự đoán khả năng chịu tải và giới hạn phá hủy của vật liệu composite [3].

Mô hình Tsai-Wu (3D) mở rộng từ tiêu chuẩn Tsai-Hill [4], giúp xác định điều kiện phá hủy trong vật liệu composite chịu tải phức hợp theo ba hướng chính:

- Dọc sợi (σ_1): Hướng theo trục chính của sợi composite.
- Ngang sợi (σ_2): Hướng vuông góc với sợi composite trong mặt phẳng composite.
- Xuyên trục (σ_3): Hướng vuông góc với cả hai hướng trên, thường quan trọng trong các kết cấu như ống composite, tấm nhiều lớp và kết cấu chịu tải trọng đa chiều [5].

Khác với các mô hình phá hủy thông

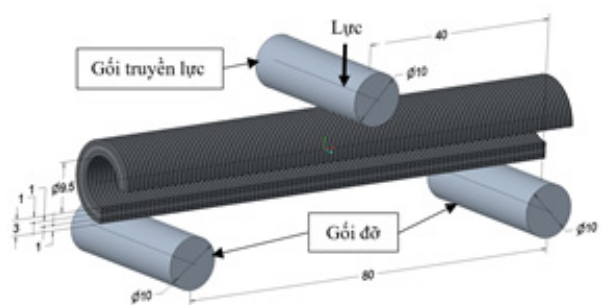
thường như Maximum Stress, Maximum Strain, hoặc von Mises, mô hình Tsai-Wu (3D) có khả năng:

- Xét đến ứng suất theo nhiều hướng cùng lúc [6].
- Dự đoán phá hủy trong các hệ composite nhiều lớp (laminate) với ma trận nhựa và sợi gia cường [7].
- Phù hợp với vật liệu có tính dị hướng (anisotropic materials), như sợi carbon, sợi thủy tinh, composite nền polymer [8].
- Ứng dụng rộng rãi trong hàng không, ô tô, dầu khí, và công nghiệp năng lượng [7].

Mô hình Tsai-Wu 3D được sử dụng để phân tích phá hủy của các cấu trúc composite chịu tải trọng phức hợp, đặc biệt trong các ngành công nghiệp yêu cầu vật liệu nhẹ nhưng bền vững như hàng không, ô tô, dầu khí và năng lượng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ VẬT LIỆU

2.1. Mô hình thử nghiệm uốn ba điểm



Hình 1. Mô hình uốn 3 điểm

Mô hình thử nghiệm uốn ba điểm như Hình 1 gồm hai gối đỡ hình trụ đặt cách nhau

một khoảng L (80mm), tải trọng P (5000N) tác dụng tại trung điểm của mẫu thử thông qua một con lăn nén. Ống composite được đặt trên hai gối đỡ và chịu tải trọng tập trung tại điểm giữa để tạo mô-men uốn tối đa.

Mẫu ống composite có cấu trúc vật liệu gồm 3 lớp lưới đan sợi Carbon 3K-240g-Honey Comb-550k (CF-CF-CF) với nhựa HDPE làm kết dính.

- Phương pháp chế tạo: Ép nhiệt (Hot Press Molding).

- Sợi Carbon 3K-240g-Honey Comb: Làm cốt gia cường, chịu ứng suất cơ học chủ yếu.

- Nhựa HDPE (High-Density Polyethylene): Đóng vai trò liên kết giữa các lớp sợi carbon.

2.2. Thông số vật liệu

Bảng 1. Các thông số vật liệu composite sử dụng trong tính toán

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Mô đun đàn hồi dọc sợi E_1	230	GPa
Mô đun đàn hồi ngang sợi E_2	15	GPa
Mô đun đàn hồi xuyên trục E_3	12	GPa
Hệ số Poisson ν_{12}	0.3	-
Mô đun cắt G_{12}	5	GPa
Cường độ kéo dọc sợi F_{t1}	2300	MPa
Cường độ nén dọc sợi F_{c1}	1300	MPa
Cường độ kéo ngang sợi F_{t2}	70	MPa
Cường độ nén ngang sợi F_{c2}	250	MPa
Cường độ kéo xuyên trục F_{t3}	50	MPa
Cường độ nén xuyên trục F_{c3}	120	MPa

3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Vật liệu composite ống 3 lớp (CF-CF-CF với HDPE) là một hệ thống vật liệu nhiều lớp có tính dị hướng, trong đó sợi carbon chịu tải chính và nhựa HDPE làm nền kết dính. Để phân tích cơ học của ống composite, cần sử dụng các phương pháp tính toán dựa trên lý thuyết composite lớp.

Việc tính toán cơ học cho ống composite gồm các bước chính:

- 1) Tính toán độ cứng tổng thể của ống composite dựa trên các lớp vật liệu.

- 2) Phân tích ứng suất và biến dạng của ống composite khi chịu tải.

- 3) Sử dụng mô hình phá hủy phù hợp (Tsai-Wu 3D) để đánh giá độ bền của ống composite.

3.1. Phương pháp tính toán độ cứng và ứng suất của ống composite

3.1.1. Tính toán mô đun đàn hồi của ống composite

Để tính toán mô đun đàn hồi tổng thể của ống composite 3 lớp, sử dụng phương trình quy đổi theo lý thuyết hỗn hợp của composite:

$$E_c = V_f E_f + V_m E_m \quad (1)$$

Trong đó:

- E_c : Mô đun đàn hồi tổng thể của composite.

- V_f : Tỷ lệ thể tích sợi carbon.

- V_m : Tỷ lệ thể tích nhựa HDPE.

- E_f : Mô đun đàn hồi của sợi carbon ($E_f \approx 230\text{GPa}$) [13].

- E_m : Mô đun đàn hồi của nhựa HDPE ($E_m \approx 1.5\text{GPa}$).

3.1.2. Phân tích ứng suất trong ống composite

a) Ứng suất theo lý thuyết vỏ mỏng

Với ống composite mỏng, có thể sử dụng mô hình lý thuyết vỏ mỏng để tính ứng suất [15]:

$$\sigma_1 = \frac{M_{\max} \cdot c}{I}, \sigma_2 = \frac{t}{D_o}, \sigma_3 = \frac{t}{(D_o + D_i)} \sigma_1 \quad (2)$$

Trong đó:

- σ_1 : Ứng suất dọc trục.
- σ_2 : Ứng suất ngang.
- σ_3 : Ứng suất xuyên trục.
- $M_{\max}$: Moment uốn cực đại.
- c : Khoảng cách từ trục trung hòa đến bề mặt ngoài của ống.
- I : Moment quán tính của tiết diện ống.
- t : Độ dày thành ống.
- D_o, D_i : Đường kính ngoài và trong của ống.

b) Phương pháp tính toán ứng suất theo lý thuyết vỏ dày

Nếu ống composite có thành dày, cần sử dụng lý thuyết ứng suất vỏ dày [16]:

$$\sigma_r = \frac{P_i R_i^2 - P_o R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{(P_o - P_i) P_i R_o^2}{(R_o^2 - R_i^2) r^2} \quad (3)$$

Trong đó:

- σ_r : Ứng suất xuyên hướng kính.
- P_i, P_o : Áp suất bên trong và bên ngoài ống.
- R_i, R_o : Bán kính trong và ngoài của ống.
- r : Bán kính tại điểm tính toán.

3.2. Tiêu chuẩn phá hủy vật liệu composite theo Tsai-Wu 3D

Mô hình phá hủy Tsai-Wu 3D được thiết

lập dựa trên hàm ứng suất phi tuyến, được công bố lần đầu bởi [3] và sau đó mở rộng trong các nghiên cứu về cơ học vật liệu composite [5].

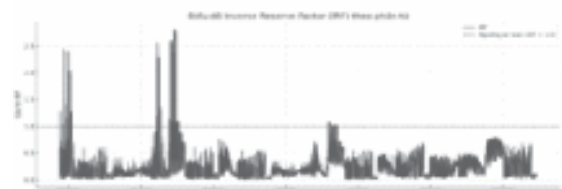
Phương trình tổng quát của tiêu chuẩn Tsai-Wu 3D được biểu diễn như sau:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + F_{44} \tau_{23}^2 + F_{55} \tau_{13}^2 + F_{66} \tau_{12}^2 \leq 1 \quad (4)$$

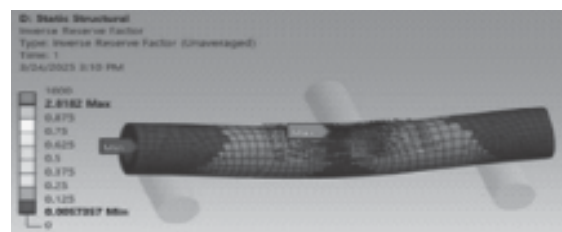
Trong đó:

- σ_1 : Ứng suất dọc trục (hướng theo sợi).
- σ_2 : Ứng suất ngang trục (vuông góc với sợi).
- σ_3 : Ứng suất xuyên trục (vuông góc với cả hai hướng trên).
- F_1, F_2, F_3 : Hệ số phá hủy tuyến tính theo từng hướng.
- F_{11}, F_{22}, F_{33} : Hệ số phá hủy phi tuyến theo từng hướng.
- F_{12}, F_{23}, F_{13} : Hệ số tương tác ứng suất giữa hai phương.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

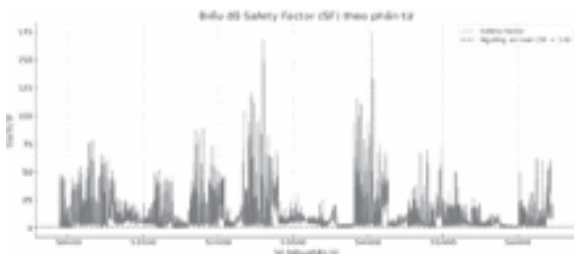


Hình 2. Biểu đồ trên thể hiện chỉ số Inverse Reserve Factor (IRF) của các phần tử composite trong mô hình

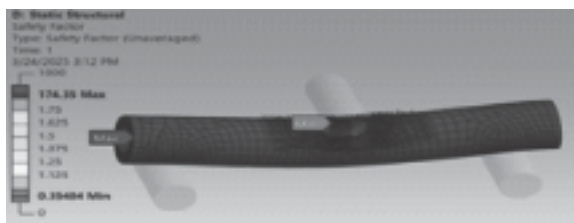


Hình 3. Kết quả phân bố IRF trên mô hình ống composite trong ANSYS

Sử dụng hệ số dự trữ an toàn Inverse Reserve Factor (IRF) giúp xác định mức độ an toàn của vật liệu dưới tải trọng. Kết quả tính toán chỉ số IRF được biểu diễn bằng đồ thị mối quan hệ giữa IRF và các phần tử composite Hình 2, cho thấy có nhiều điểm nhô lên vượt ngưỡng 1.0, đặc biệt một số phần tử có giá trị lên tới 2.8, cho thấy vượt quá khả năng chịu lực gấp gần 3 lần. Mô phỏng cho giá trị IRF lớn nhất 2.8182 tập trung tại điểm đặt tải trọng hình 3, vượt quá giới hạn bền vật liệu và giá trị nhỏ nhất 0.0057 có ứng suất thấp hơn nhiều.



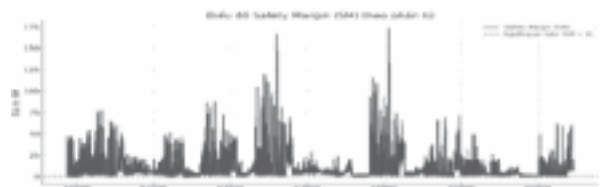
Hình 4. Biểu đồ Safety Factor (SF) theo phần tử



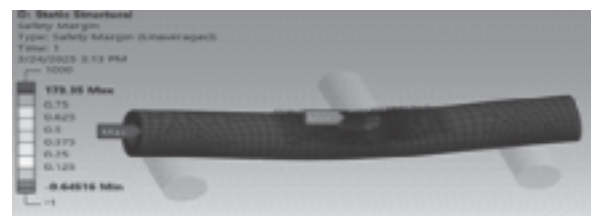
Hình 5. Kết quả phân bố SF trên mô hình ống composite trong ANSYS

Trong phân tích cơ học hệ số an toàn (Safety Factor - SF) dùng để đánh giá mức độ an toàn của một cấu trúc hoặc vật liệu dưới tác động của tải trọng. Chỉ số SF là chỉ số quan trọng giúp xác định xem cấu trúc có thể chịu được tải trọng mà không bị phá hủy hay không. Kết quả tính toán chỉ số SF được biểu diễn bằng đồ thị mối quan hệ giữa SF và các phần tử composite Hình 4, cho thấy có nhiều phần tử nằm dưới ngưỡng an toàn, đặc biệt trong khoảng phần tử từ 49800 đến 50000 và một số vùng khác giữa ống. Ngoài ra, một số điểm có SF rất cao

(>150), các phần tử này hầu như không chịu tải, không nguy hiểm. Kết quả mô phỏng hình 5 cho thấy vùng nguy hiểm tập trung tại giữa ống đạt giá trị thấp nhất (0.3548) và vùng ít chịu ứng suất có giá trị an toàn lớn nhất 174.35. Tại vùng có hệ số an toàn nhỏ nhất (0.3548), điều này xác nhận rằng vật liệu composite bị phá hủy.



Hình 6. Biểu đồ Safety Margin (SM) theo phần tử



Hình 7. Kết quả phân bố SM trên mô hình ống composite trong ANSYS

Biên An Toàn (Safety Margin - SM) là một chỉ số quan trọng dùng để đo lường mức độ an toàn của vật liệu hoặc cấu trúc dưới tải trọng thực tế. SM cho biết mức chênh lệch giữa ứng suất thực tế và giới hạn bền của vật liệu theo một tỷ lệ nhất định. Biểu đồ Hình 6 thể hiện giá trị SM của các phần tử trong mô hình ống composite dưới tải trọng uốn ba điểm. Đa số phần tử có $SM > 0$, nghĩa là các vùng này vẫn còn khả năng chịu tải, chưa bị phá hủy. Tuy nhiên, nhiều phần tử có giá trị SM xấp xỉ hoặc nhỏ hơn 0, rơi vào vùng nguy hiểm, đặc biệt ở khu vực giữa ống tại vị trí tác dụng lực lớn nhất trong thí nghiệm uốn. Một số cụm phần tử SM tăng vọt, biểu thị các vùng ít chịu tải hoặc có sự phân tán ứng suất tốt hơn. Kết quả phân tích hình 7 cho thấy vùng nguy hiểm nhất tiếp xúc với tải trọng tập trung giữa ống có giá trị nhỏ

nhất 0.64516 và vùng ít chịu ứng suất đạt giá trị lớn nhất 173.35.

5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy chỉ số phá hủy Tsai-Wu 3D đạt $\Phi_{\text{Tsai-Wu}} = 26.16$ (>1), khẳng định rằng vật liệu bị phá hủy dưới tải trọng 5000N. Mô phỏng ANSYS xác nhận kết quả này với hệ số an toàn nhỏ nhất $SF = 0.3548$, hệ số nghịch đảo $IRF = 2.8182$ và biên an toàn (Safety Margin) = -0.64516, cho thấy vật liệu không đủ bền để chịu tải trọng áp dụng. Nghiên cứu này đã phân tích thử nghiệm uốn ba điểm trên ống composite 3 lớp CF-CF-CF với HDPE theo tiêu chuẩn Tsai-Wu 3D. Kết quả mô phỏng ANSYS FEM cho thấy vật liệu bị phá hủy dưới tải trọng 5000N, với nguyên nhân chính là ứng suất uốn ngang và cắt xuyên trục vượt quá giới hạn bền, cho nên tiêu chuẩn Tsai-Wu 3D là công cụ để dự đoán phá hủy vật liệu composite. Để cải thiện độ bền, cần tăng độ dày thành ống để giảm ứng suất uốn và cắt, thay đổi hướng sợi carbon từ 0° sang $\pm 45^\circ$ để tối ưu hóa phân bố ứng suất, sử dụng vật liệu nền có độ bền cao hơn thay vì HDPE và giảm tải trọng hoặc bổ sung kết cấu gia cố để đảm bảo an toàn.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 20/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Mallick, P. K., “*Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design (3rd ed.)*”. CRC Press. 2007, 126-130.
- [2]. Hull, D., & Clyne, T. W., “*An Introduction to Composite Materials (2nd ed.)*”. Cambridge University Press. 1996, 45-50.
- [3]. Tsai, S. W., & Wu, E. M., “*A General Theory of Strength for Anisotropic Materials*”. Journal of Composite Materials, 5(1), 58-80. DOI: 10.1177/002199837100500106.1971, 65-68.
- [4]. Daniel, I. M., & Ishai, O., “*Engineering Mechanics of Composite Materials (2nd ed.)*”. Oxford University Press. 2006, 210-213.
- [5]. Gibson, R. F., “*Principles of Composite Material Mechanics (4th ed.)*”. CRC Press. 2016, 340-345.
- [6]. Kaw, A. K., “*Mechanics of Composite Materials (2nd ed.)*”. CRC Press. 2006 278-282).
- [7]. Jones, R. M., “*Mechanics of Composite Materials (2nd ed.)*”. Taylor & Francis. 1999, 240-245.
- [8]. Mallick, P. K., “*Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design (3rd ed.)*”. CRC Press. 2007, 198-203.

MÔ HÌNH HÓA HƯ HỎNG THEO TIÊU CHUẨN HASHIN CỦA VẬT LIỆU TẦM HYBRID METAL/CFRP/METAL CHỊU TẢI UỐN 3 ĐIỂM TRONG MÔI TRƯỜNG PHẦN TỬ HỮU HẠN

HASHIN-BASED DAMAGE MODELING OF METAL/CFRP/METAL HYBRID LAMINATES UNDER THREE-POINT BENDING LOAD IN A FINITE ELEMENT ENVIRONMENT

TS. Lê Văn An, TS. Trương Công Tiễn

Khoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Email: lvan@ntt.edu.vn; tctien@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Vật liệu tấm hybrid là vật liệu lai kết hợp giữa kim loại và composite gia cường sợi, điển hình là cấu trúc (GB/T700)/CFRP/(GB/T700), có tính chất cơ học vượt trội. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA) trong phần mềm Abaqus để mô phỏng trạng thái uốn ba điểm của tấm hybrid. Một mô hình số chi tiết được xây dựng, trong đó lớp CFRP được áp dụng tiêu chí hư hỏng Hashin, còn thép sử dụng mô hình phá hủy dẻo. Phân tích xem xét tính phi tuyến vật liệu và sự tiến triển hư hỏng để mô phỏng chính xác hành vi uốn. Kết quả cho thấy tấm lai có độ bền uốn cao, với hư hỏng chủ yếu bắt đầu từ lớp CFRP do đứt sợi và nứt ma trận. Lớp thép chịu biến dạng dẻo, giúp tăng cường khả năng chống chịu của toàn bộ kết cấu. Mô phỏng cung cấp cái nhìn sâu sắc về phân bố ứng suất và cơ chế hư hỏng của tấm hybrid. Nghiên cứu khẳng định FEA là một công cụ hiệu quả dự đoán đặc tính cơ.

Từ khóa: Tấm hybrid; (GB/T700)/CFRP/(GB/T700); Uốn ba điểm; Abaqus; Tiêu chuẩn Hashin; FEA.

ABSTRACT

Hybrid laminate materials are composite structures combining metal and fiber-reinforced composites, typically in a (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) configuration, offering superior mechanical properties. This study employs the finite element analysis (FEA) method using Abaqus software to simulate the three-point bending behavior of the hybrid laminate. A detailed numerical model is developed, where the CFRP layer is modeled using the Hashin damage criteria, and the steel layers adopt a ductile damage model. The analysis accounts for material nonlinearity and damage evolution to accurately capture the bending behavior. Results show that the hybrid laminate exhibits high flexural strength, with damage initiating primarily in the CFRP layer due to fiber breakage and matrix cracking. The steel layers undergo plastic deformation, contributing to the overall structural resistance. The simulation provides valuable insights into stress distribution and failure mechanisms of the hybrid laminate. The study confirms that FEA is an effective tool for predicting mechanical properties.

Keywords: Hybrid laminate; (GB/T700)/CFRP/(GB/T700); Three-point bending; Abaqus; Hashin criterion; Finite element analysis.

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, nhu cầu về vật liệu hiệu suất cao trong công nghiệp ngày càng gia tăng, đòi hỏi vật liệu phải có tính cơ học cao cũng như trọng lượng nhẹ. Vật liệu tấm hybrid là một loại vật liệu lai hiện đại, bao gồm các lớp kim loại và polymer được gia cường bằng sợi cacbon xen kẽ nhau. Vật liệu tấm hybrid, đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực hàng không, ô tô và kết cấu chịu tải trọng cao nhờ vào các đặc tính ưu việt như tỷ lệ cường độ trên khối lượng cao, hấp thụ năng lượng tốt [1, 2]. Ngoài ra, với sự tối ưu hóa quy trình sản xuất vật liệu và giảm chi phí sản xuất, các tấm lai kim loại sợi (FMLs) còn được sử dụng trong các lĩnh vực công nghiệp khác như thiết bị thể thao và kỹ thuật ô tô [3, 4]. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện để phân tích các tính chất cơ học động và tĩnh của FMLs nhờ vào ưu điểm trọng lượng nhẹ, độ bền cao, khả năng chịu va đập tốt [5, 6] và độ bền chống hư hỏng cao [7].

Các kỹ thuật mô phỏng số đã được sử dụng để mô phỏng quá trình tải tĩnh gần như tĩnh của các tấm, nhằm khám phá các dạng hư hỏng cụ thể bên trong FMLs và phân tích đặc tính hấp thụ năng lượng. Điều này cung cấp giá trị tham khảo quan trọng cho ứng dụng kỹ thuật thực tế của các tấm. Để hiểu rõ hơn về đặc tính cơ học và cơ chế hư hỏng của vật liệu CARALLs (Carbon fiber Reinforced composites/Aluminum Laminates) dưới tác động của thử nghiệm uốn ba điểm, Hu và cộng sự đã thực hiện các thí nghiệm thực nghiệm kết hợp với mô phỏng số. Kết quả nghiên cứu làm sáng tỏ ảnh hưởng của cấu trúc xếp lớp giữa nhôm và sợi carbon đối với tính chất cơ học của mẫu vật CARALLs [8]. Sellitto và cộng sự

cũng đã tiến hành nghiên cứu về phản ứng cơ học của các tấm laminate hình chữ nhật dưới tác động va đập tốc độ thấp, trong đó họ sử dụng phương pháp mô phỏng số để phân tích hành vi va đập của các vật liệu composite.

Tiếp nối các nghiên cứu trên dựa trên sự kết hợp giữa độ bền cao và trọng lượng nhẹ của CFRP với tính dẻo và khả năng chống va đập của thép giúp cho loại vật liệu này trở thành lựa chọn tối ưu trong các kết cấu yêu cầu độ cứng vững và độ bền cao. Nhiều nghiên cứu trước đây đã phân tích đặc tính cơ học của vật liệu tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) dưới các điều kiện kéo, va đập và mỏi. Tuy nhiên, hành vi của chúng khi chịu uốn ba điểm, một yếu tố quan trọng trong thiết kế kết cấu, vẫn chưa được nghiên cứu sâu rộng, đặc biệt là trong bối cảnh mô phỏng số.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Nghiên cứu này được thực hiện trên phần mềm thương mại Abaqus quá trình thử uốn 3 điểm theo tiêu chuẩn D7264. CFRP là vật liệu composite sợi carbon T700 được sản xuất bởi Toray, Tokyo, Nhật bản với độ dày 2mm. Nhựa prepreg tiêu chuẩn với hàm lượng nhựa 38% đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Các tính chất của vật liệu CFRP được trình bày ở bảng 1. Trong đó E_1 là mô đun đàn hồi dọc, E_2 là mô đun đàn hồi ngang, ν là hệ số Poisson, và G là mô đun cắt. Các tấm thép GB/T700 thuộc nhóm cacbon thấp có độ dẻo cao, có độ dày 1 mm đã được lựa chọn, và các tính chất được trình bày ở bảng 2.



Bảng 1. Các tính chất cơ của CFRP (T700).

Mật độ (Kg/cm ³)	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	μ_{12}	G ₁₂ (GPa)	G ₁₃ (GPa)	G ₂₃ (GPa)
1560	130	8	0.28	4.5	4.5	3.6

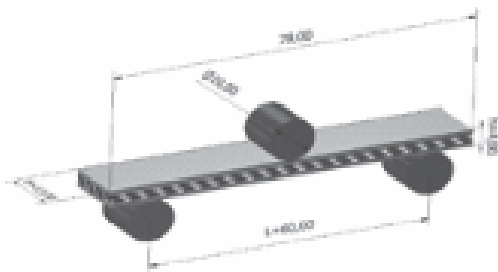
Bảng 2. Các tính chất cơ của GB/T700.

Khối lượng riêng (g/cm ³)	Mô đun đàn hồi E (GPa)	Giới hạn kéo (MPa)	Giới hạn chảy (MPa)	Hệ số Poisson ν
7.85	210	450	235	0.3

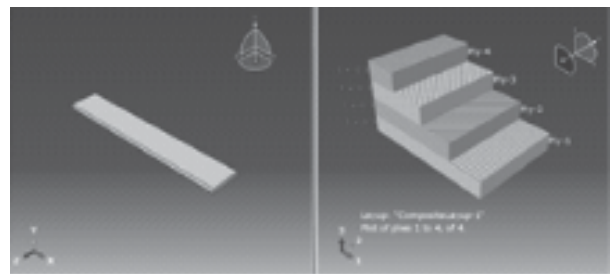
2.2. Phương pháp nghiên cứu

Hiệu suất uốn của tấm hybrid được nghiên cứu thông qua thí nghiệm uốn ba điểm theo tiêu chuẩn ASTM D7264 thông qua máy thử điện tử vạn năng TSE105D. Các mẫu sử dụng trong kiểm tra có chiều dài 78mm, chiều rộng 13 mm và khoảng cách giữa 2 gối đỡ là 60mm, tấm có độ dày 4mm, gối đỡ có đường kính 10mm. Như vậy, để mô phỏng chính xác hơn mô hình mô phỏng được tạo ra giống với thực nghiệm thấy như hình 1, với kích thước tấm cụ thể như sau:

- Lớp thép GB/T700 có độ dày 1mm.
- Lớp CFRP có tổng độ dày 2 mm. Mỗi lớp prepreg có độ dày 0.5mm. Bốn lớp được sắp xếp theo hướng của trục chính (0/45/-45/90) như thấy ở hình 2.



Hình 1. Mô hình thử uốn 3 điểm theo tiêu chuẩn D7264



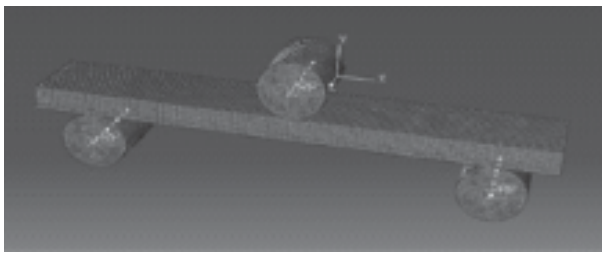
Hình 2. Mô hình định hướng sợi mỗi lớp của tấm CFRP

2.3. Mô hình phần tử hữu hạn và tiêu chuẩn hư hỏng

2.3.1. Mô hình phần tử hữu hạn 3 điểm uốn cho tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Để mô hình chính xác trạng thái của tấm hybrid trong phân tích phần tử hữu hạn, bán kính mũi tải và giá đỡ và kích thước FMLs giống như thực nghiệm. Sự tiếp xúc mặt – mặt được đưa vào giữa các tấm, đầu tải và giá đỡ, và thuộc tính tiếp xúc bình thường được thiết lập là tiếp xúc cứng, thuộc tính tiếp xúc tiếp tuyến với hàm phạt và hệ số ma sát là 0.25. Điều kiện biên của giá đỡ là cố định hoàn toàn và ràng buộc đối xứng được thiết lập cho hai bề mặt của tấm để tránh sự dịch chuyển của vật cứng. Một điểm tham chiếu được thiết lập ở mũi tải và tất cả các bậc tự do đều được ràng buộc trừ hướng tải. Sự dịch chuyển tải ở điểm

tham chiếu được thiết lập, và phản ứng hỗ trợ cùng với độ dịch chuyển của điểm tham chiếu được đưa ra. Các tấm thép GB/T700, mũi tải và giá đỡ được mô hình hóa bởi các phần tử C3D8I và R3D4 tương ứng. Lớp CFRP được mô hình hóa bằng phần tử SC8R. Các thông số vật liệu được sử dụng phù hợp với những gì đưa ra ở trên. Mô hình phần tử được thiết lập theo các ràng buộc và vật liệu trên như thấy ở hình 3 bên dưới.



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn 3 điểm uốn của tấm hybrid

2.3.2. Mô hình hư hỏng cho tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

2.3.2.1. Mô hình hư hỏng tấm thép GB/T700

Thép T700 đã áp dụng mô hình đàn hồi dẻo. Pha đàn hồi tuyến tính của thép được mô hình hóa như một điều kiện đẳng hướng, được xác định bởi mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của nó. Hơn nữa, thép T700 dùng tiêu chuẩn hư hỏng dẻo để đánh giá sự hư hỏng ban đầu của nó. Tiêu chuẩn này được giả định rằng sự biến dạng dẻo xảy ra trong suốt quá trình đặt tải vật liệu dẫn đến sự hình thành, phát triển và sự kết tụ các lỗ rỗng và vết nứt tế vi ở bên trong nó làm giảm độ cứng vật liệu và làm giảm hiệu suất của nó. Sự hư hỏng được giả định xảy ra khi ε biến dạng dẻo tương đương là một hàm của tốc độ biến dạng và ứng suất 3 trục:

$$\omega_D = \int \frac{d\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_D^{pl}(\eta, \varepsilon^{pl})} = 1 \quad (1)$$

Trong đó $\eta = -p/q$, p là ứng suất nén, q là ứng suất tương đương Von Mises, và ω_D là biến trạng thái tăng đơn điệu theo biến dạng dẻo. Dựa vào lý thuyết cơ học hư hỏng liên tiếp, quá trình phát triển hư hỏng như sau:

$$\sigma = D^{el}/(\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (2)$$

$$D^{el} = (1-d) D_0^{el} \quad (3)$$

Trong đó, D_0^{el} là độ cứng đàn hồi ban đầu, D^{el} là độ cứng sau khi hiệu suất suy giảm và ε^{pl} là sự biến dạng dẻo tương đương tại bất kỳ thời điểm nào. Biến hư hỏng độ cứng d thay đổi từ 0 đến 1, tiêu biểu cho bắt đầu hư hỏng đến nứt hoàn toàn.

2.3.2.2. Mô hình hư hỏng tấm CFRP theo tiêu chuẩn Hashin

Tiêu chuẩn Hashin là một mô hình hư hỏng từng bước dựa trên ứng suất. Mô hình này đưa ra giả thiết rằng vật liệu vẫn có một số khả năng chịu lực ngay cả sau khi hư hỏng xảy ra và xem xét sự tác động cắt vào sự đứt gãy kéo sợi. Tiêu chuẩn Hashin dự đoán 4 phương thức hư hỏng khác nhau: hư hỏng kéo sợi, hư hỏng nén sợi, hư hỏng kéo nền, và hư hỏng nén nền. Do đó, việc đánh giá mức độ hư hỏng sẽ chính xác hơn:

$$F_{ft} = \frac{\sigma_{11}^2}{X_T^2} + \alpha \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \right)^2 = 1 \quad (\sigma_{11} \geq 0) \quad (4)$$

$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 = 1, \quad (\sigma_{11} < 0) \quad (5)$$

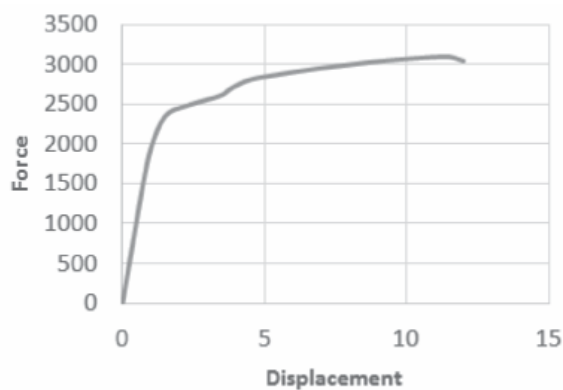
$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T^2} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0) \quad (6)$$

$$F_{mc} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1, (\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0) \quad (7)$$

F_{ft} , F_{fc} , F_{mt} , F_{mc} tiêu biểu cho hư hỏng kéo sợi, hư hỏng nén sợi, hư hỏng kéo nền, và hư hỏng nén nền. σ tiêu biểu cho ứng suất hướng lên của mỗi bên, trong đó chữ số mũ T biểu thị hướng kéo, C biểu thị hướng nén. Y tiêu biểu cho độ bền theo hướng của sợi, X tiêu biểu cho độ bền theo hướng của nền, và S tiêu biểu cho độ bền cắt mỗi bên.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

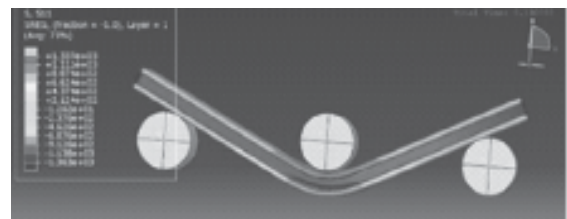
Trong nghiên cứu này, chúng tôi chỉ thảo luận kết quả mô phỏng kiểm tra 3 điểm uốn của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700). Tấm hybrid gồm có 2 tấm thép GB/T700 và 1 tấm CFRP gồm 4 lớp được định hướng như hình 2. Sự khác nhau về mô đun và độ bền của vật liệu thép GB/T700 và CFRP dẫn đến trạng thái cơ học khác nhau.



Hình 4. Đường cong Lực – chuyển vị của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Hình 4 minh họa đường cong Lực – chuyển vị của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/

(GB/T700). Có thể thấy rằng có một sự khác nhau đáng kể. Đường cong chia thành ba giai đoạn chính: giai đoạn đàn hồi, và biến dạng dẻo của lớp thép T700, và đứt sợi. Ở giai đoạn đầu, đường cong tăng gần như tuyến tính, cho thấy tấm đang biến dạng đàn hồi, cả lớp CFRP và lớp thép đều ở trạng thái đàn hồi, không có hư hỏng và mẫu khôi phục hoàn toàn khi bỏ tải. Tiếp tục đặt tải, độ dốc đường cong giảm dần, chứng tỏ xuất hiện biến dạng dẻo. Thép T700 bắt đầu chảy dẻo, trong khi CFRP vẫn còn trong giới hạn đàn hồi, lực tiếp tục tăng nhưng với tốc độ thấp hơn do tấm hybrid bắt đầu chịu ứng suất cao. Ở giai đoạn thứ 3, khi biểu đồ đạt đến giá trị cực đại 3094,97 N, sau đó có xu hướng giảm. Lúc này, CFRP bắt đầu gãy hoặc nứt do ứng suất kéo vượt quá giới hạn của sợi cacbon, làm mất khả năng chịu tải của tấm. Khi CFRP bị phá hủy, thép T700 tiếp tục chịu tải nhưng không còn hiệu quả như trước, dẫn đến giảm tải trọng.



Hình 5. Biểu đồ phân bố ứng suất dọc của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)



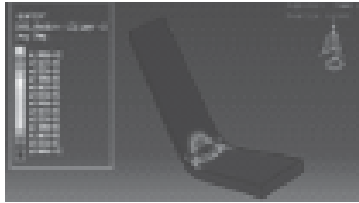
a. Hư hỏng kéo sợi theo tiêu chuẩn Hashin



b. Hư hỏng nén sợi theo tiêu chuẩn Hashin



c. Hư hỏng kéo đứt sợi theo tiêu chuẩn Hashin



d. Hư hỏng nén vỡ theo tiêu chuẩn Hashin

Hình 6. Trạng thái hư hỏng CFRT theo tiêu chuẩn Hashin

Từ hình 5 biểu đồ phân bố ứng suất dọc của tấm (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) tại thời điểm phá hủy. Trong suốt quá trình uốn 3 điểm, lớp thép T700 ở phía trên của mẫu chịu ứng suất nén, trong khi tấm thép ở phía dưới chịu ứng suất nén. Nửa trên của lớp CFRP chịu nén, trong khi nửa dưới của lớp CFRP chịu kéo giãn.

Hình 6 cho thấy vị trí bắt đầu xuất hiện hư hỏng của tấm hybrid chủ yếu tập trung ở sự hư hỏng tấm CFRP theo tiêu chuẩn Hashin. Hình 6a thể hiện sự hư hỏng kéo đứt sợi bắt đầu xuất hiện ở một vài vị trí lớp thứ tư của tấm CFRP khi chịu ứng suất kéo lớn tại thời điểm chuyển vị $U_2 = 3.981$. Hình 6b cho thấy sợi bắt đầu bị đứt nén khi chịu ứng suất nén lớn tại một vài vị trí ở lớp thứ 1 của tấm CFRP tại vị trí chuyển vị $U_2 = 6.051$ mm. Hình 6c cho thấy một vài vị trí nền CFRP bắt đầu hư hỏng khi chịu ứng suất nén chủ yếu xuất hiện ở lớp thứ 4 của tấm CFRP lúc chuyển vị đạt vị trí $U_2 = 7.471$ mm, đồng thời cũng bắt đầu xuất hiện vết nứt tại lớp thứ nhất tiếp giáp lớp thép GB/T700 do bị kéo vượt quá giới hạn theo hướng sợi (độ bền dọc sợi) sợi cacbon có thể bị đứt. Hình 6d cho thấy nền bắt đầu hư hỏng nén ở lớp thứ 1

của tấm CFRP khi sợi trong lớp này bị đứt hoàn toàn nên lúc này chịu ứng suất nén cực lớn dẫn đến hư hỏng nền tại vị trí $U_2 = 12.815$ mm lúc này tấm CFRP bị hư hỏng hoàn toàn dẫn đến ứng suất bắt đầu giảm.

4. KẾT LUẬN

Mô phỏng độ bền uốn 3 điểm của tấm hybrid FMLs (Fiber Metal Laminates) với cấu trúc tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) trong Abaqus cho thấy quá trình hư hỏng diễn ra theo ba giai đoạn chính. Ban đầu, tấm FMLs duy trì trạng thái đàn hồi, với cả thép GB/T700 và CFRP không bị hư hỏng. Khi tải tăng, thép GB/T700 bắt đầu biến dạng dẻo trong khi CFRP vẫn trong giới hạn đàn hồi. Tuy nhiên, khi tải đạt giá trị cực đại 3094,97 N, lớp CFRP bắt đầu hư hỏng, xuất hiện đứt sợi và vết nứt do ứng suất kéo vượt quá giới hạn chịu của sợi carbon. Sự hư hỏng này chủ yếu xảy ra ở các lớp CFRP phía dưới và lớp CFRP tiếp giáp với thép T700. Sau khi CFRP bị phá hủy, khả năng chịu tải của tấm giảm mạnh mặc dù thép T700 vẫn tiếp tục chịu tải, nhưng không còn hiệu quả như trước.

Kết quả mô phỏng cho thấy sự kết hợp giữa thép và CFRP giúp tận dụng ưu điểm của cả hai vật liệu, nhưng sự hư hỏng của CFRP làm giảm đáng kể khả năng chịu lực của tấm hybrid. Mô phỏng này cung cấp cơ sở để tối ưu hóa thiết kế tấm FMLs, cải thiện độ bền và hiệu quả chịu lực trong các ứng dụng thực tế.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 20/4/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ostapiuk, M.; Bienias, J.; Surowska, B., “*Analysis of the bending and failure of fiber metal laminates based on glass and carbon fibers*”. Sci. Eng. Compos. Mater. 2018, 25, 1095-1106.
- [2]. Rajkumar, G.R.; Krishna, M.; Narasimhamurthy, H.N.; Keshavmurthy, Y.C.; Nataraj, J.R., “*Investigation of Tensile and Bending behavior of Aluminum based hybrid fiber metal laminates*”. Procedia Mater. Sci. 2014, 5, 60-68.
- [3]. Li, H.; Xu, Y.; Hua, X.; Liu, C.; Tao, J., “*Bending failure mechanism and flexural properties of GLARE laminates with different stacking sequences*”. Compos. Struct. 2018, 187, 354-363.
- [4]. Kuhtz, M.; Buschner, N.; Henseler, T.; Hornig, A.; Klaerner, M.; Ullmann, M.; Jaeger, H.; Kroll, L.; Kawalla, R., “*An experimental study on the bending response of multi-layered fibre-metal-laminates*”. J. Compos. Mater. 2019, 53, 2579-2591
- [5]. Yu, G.-C.; Wu, L.-Z.; Ma, L.; Xiong, J., “*Low velocity impact of carbon fiber aluminum laminates*”. Compos. Struct. 2015, 119, 757-766.
- [6]. Vieira, L.M.G.; Dobah, Y.; dos Santos, J.C.; Panzera, T.H.; Rubio, J.C.C.; Scarpa, F., “*Impact Properties of Novel Natural Fibre Metal Laminated Composite Materials*”. Appl. Sci. 2022, 12, 1869.
- [7]. Vieira, L.M.G.; Dobah, Y.; dos Santos, J.C.; Panzera, T.H.; Rubio, J.C.C.; Scarpa, F., “*Impact Properties of Novel Natural Fibre Metal Laminated Composite Materials*”. Appl. Sci. 2022, 12, 1869.
- [8]. Hu, C.; Sang, L.; Jiang, K.; Xing, J.; Hou, W., “*Experimental and numerical characterization of flexural properties and failure behavior of CFRP/Al laminates*”. Compos. Struct. 2022, 281, 115036.

TỐI ƯU HÓA HƯỚNG SỢI BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ NHẪM NÂNG CAO ĐỘ BỀN UỐN CỦA TẤM HYBRID KIM LOẠI/CFRP/KIM LOẠI

NUMERICAL OPTIMIZATION OF FIBER ORIENTATION FOR IMPROVED FLEXURAL STRENGTH IN METAL/CFRP/METAL HYBRID LAMINATES

ThS. Dương Lê Hùng, ThS. Bùi Chấn Thanh

Khoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Email: dlhung@ntt.edu.vn;

bcthanh@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của định hướng sợi trong lớp CFRP đến khả năng chịu uốn bốn điểm của tấm vật liệu hybrid THÉP/CFRP/THÉP được khảo sát bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình số được xây dựng trong phần mềm Abaqus, trong đó lớp CFRP được mô hình hóa theo cấu trúc tấm với các cấu hình định hướng sợi khác nhau bao gồm $[0/0/0/0]$, $[90/90/90/90]$, $[45/45/45/45]$, $[0/90/90/0]$. Tiêu chuẩn phá hủy Hashin được áp dụng để mô phỏng sự hư hỏng tiến triển của vật liệu composite. Các thông số như lực cực đại, độ chuyển vị và cơ chế phá hủy được phân tích và so sánh giữa các cấu hình. Kết quả cho thấy định hướng sợi ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu uốn của tấm hybrid, trong đó các cấu trúc tấm hybrid đa hướng như $[0/90/90/0]$ thể hiện sự phân bố ứng suất đồng đều và khả năng hấp thụ năng lượng tốt hơn. Nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở thiết kế tối ưu cho các kết cấu vật liệu lai ứng dụng trong công nghiệp ô tô và hàng không.

Từ khóa: Tấm hybrid; Hướng sợi; Thử uốn 4 điểm; Mô hình phá hủy Hashin; FEA.

ABSTRACT

This study presents a numerical investigation into the influence of fiber orientation in the CFRP core layer on the four-point bending performance of STEEL/CFRP/STEEL hybrid laminates. A finite element model was developed in Abaqus, in which the CFRP layer was represented as a laminated composite with various stacking sequences, including $[0/0/0/0]$, $[0/90/90/0]$, $[45/45/45/45]$, $[0/90/90/0]$. The progressive failure behavior of the composite was simulated using the Hashin damage criterion. Key mechanical responses such as peak load, mid-span deflection, and failure modes were analyzed and compared across different fiber orientations. The results reveal that fiber orientation has a significant impact on the flexural behavior of the hybrid laminate. Among the investigated configurations, multidirectional layups such as $[0/90/90/0]$ exhibited improved stress distribution and superior energy absorption capacity. These findings provide valuable insights for the optimal design of metal-composite hybrid structures in automotive and aerospace applications.

Keywords: Hybrid laminate; Fiber orientation; Four-point bending; Hashin failure model; Finite element analysis (FEA).

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, các tấm hybrid kết hợp giữa kim loại và vật liệu composite cốt sợi đã thu hút nhiều sự quan tâm nhờ khả năng tận dụng ưu điểm của cả hai vật liệu: độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng cao của kim loại, cùng với độ bền riêng cao và trọng lượng nhẹ của composite [1-3]. Trong đó, cấu trúc tấm hybrid thép/CFRP/thép (Carbon Fiber Reinforced Polymer) được nghiên cứu rộng rãi cho các ứng dụng yêu cầu độ bền cơ học và khả năng chống phá hủy tốt, đặc biệt trong các ngành công nghiệp ô tô và hàng không [4, 5].

Trong thiết kế kết cấu, khả năng chịu uốn – đặc biệt là dưới tải bốn điểm – đóng vai trò quan trọng, phản ánh độ cứng, khả năng phân bố ứng suất và cơ chế phá hủy của vật liệu. Hành vi cơ học của các tấm hybrid dưới tải uốn chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như chiều dày lớp vật liệu, chất lượng bề mặt liên kết, và đáng chú ý nhất là hướng sợi trong lớp CFRP [6]. Cấu hình xếp lớp (stacking sequence) của CFRP quyết định tính chất dị hướng của laminate, từ đó ảnh hưởng đến sự truyền tải nội lực, vị trí khởi phát phá hủy và khả năng phân tán ứng suất [7].

Tuy nhiên, các nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa hướng sợi trong tấm laminate

lai kim loại/CFRP bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEA) vẫn còn hạn chế, đặc biệt là trong mối liên hệ với tiêu chuẩn phá hủy tiên triên như Hashin. Do đó, nghiên cứu này nhằm khảo sát ảnh hưởng của định hướng sợi đến hành vi chịu uốn bốn điểm của tấm hybrid thép/CFRP/thép bằng phương pháp mô phỏng số trong phần mềm Abaqus. Các cấu hình xếp lớp khác nhau bao gồm [0/0/0/0], [90/90/90/90], [45/45/45/45] và [0/90/90/0] được xây dựng và so sánh. Mô hình phá hủy Hashin được áp dụng để mô phỏng tiến trình hư hỏng trong lớp composite. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng sẽ cung cấp cơ sở khoa học phục vụ thiết kế tối ưu cho các kết cấu hybrid trong thực tiễn công nghiệp.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Nghiên cứu này sử dụng vật liệu CFRP là một vật liệu composite sợi carbon T700 với tính chất được thể hiện ở bảng 1. Tấm CFRP có độ dày 2mm được ép tạo thành từ 4 lớp prepreg có độ dày mỗi lớp là 0.5mm. Trong đó E_1 là mô đun đàn hồi dọc, E_2 là mô đun đàn hồi ngang, ν là hệ số Poisson, và G là mô đun cắt. Kim loại được sử dụng là tấm thép GB/T700 thuộc nhóm cacbon thấp có độ dẻo cao, có độ dày 1 mm đã được lựa chọn, và các tính chất được trình bày ở bảng 2.

Bảng 1. Các tính chất vật liệu của CFRP (T700)

Density (Kg/cm ³)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	μ_{12}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
1560	130	8	0.28	4.5	4.5	3.6

Bảng 2. Các tính chất vật liệu của GB/T700

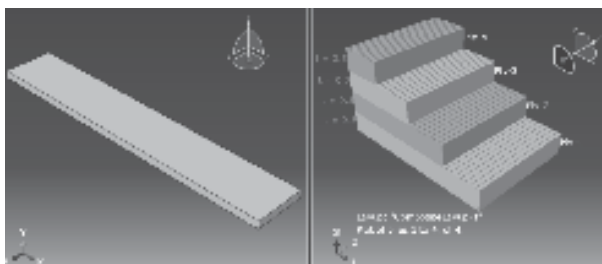
Density (g/cm ³)	Elastic modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Poisson's ratio ν
7.85	210	450	235	0.3

2.2. Phương pháp nghiên cứu

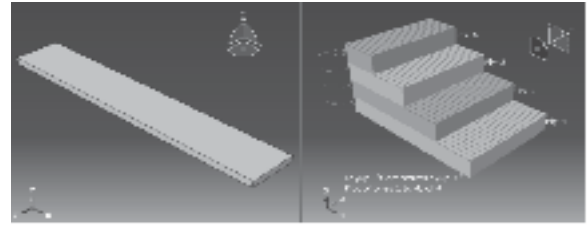
Nghiên cứu này được thực hiện sử dụng phần mềm thương mại Abaqus để mô phỏng bài kiểm tra uốn 4 điểm. Tấm hybrid có chiều dài 78 mm, chiều rộng 13 mm và chiều dày 2 mm. Khoảng cách giữa hai điểm hỗ trợ là $L = 60$ mm như thấy ở Hình 2. Thanh vật liệu được đặt trên hai điểm tựa và chịu tải tại hai điểm (bằng hai mũi tải), mỗi mũi tải cách đều điểm tựa kế cận. Khoảng cách giữa các mũi tải (tức là chiều dài tải) bằng một nửa chiều dài giữa các điểm tựa.

2.2.1. Mô hình phần tử hữu hạn

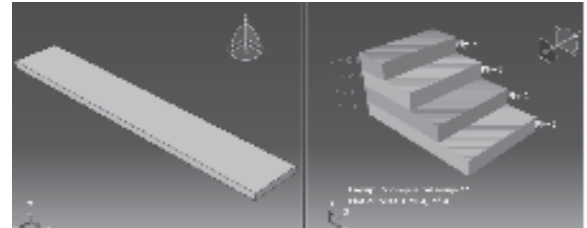
Cấu trúc tấm hybrid bao gồm một lớp CFRP dày 2 mm và một lớp thép GB/T700 dày 1 mm. Lớp CFRP bao gồm bốn lớp prepreg được định hướng sợi theo các trường hợp nghiên cứu tương ứng $[0]_4$, $[90]_4$, $[+45]_4$, và $[0/90/90/0]$ như thấy ở Hình 1. Lưới mạng tinh vi được áp dụng, sử dụng phần tử C3D8R cho thép GB/T700 và phần tử SC8R cho CFRP, phần tử R3D4 cho các điểm hỗ trợ và mũi tải. Mật độ lưới được tối ưu hóa để cân bằng độ chính xác và hiệu quả tính toán, như thể hiện trong Hình 3. Tiếp xúc mặt đối mặt được thiết lập giữa các lớp laminate, đầu tác dụng tải và gối đỡ; trong đó thuộc tính tiếp xúc theo phương pháp pháp tuyến được thiết lập là tiếp xúc cứng, thuộc tính tiếp xúc theo phương tiếp tuyến sử dụng hàm phạt, và hệ số ma sát được đặt là 0.25.



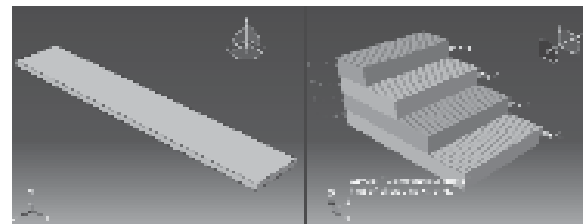
a. Định hướng sợi 90/90/90/90



b. Định hướng sợi 0/0/0/0

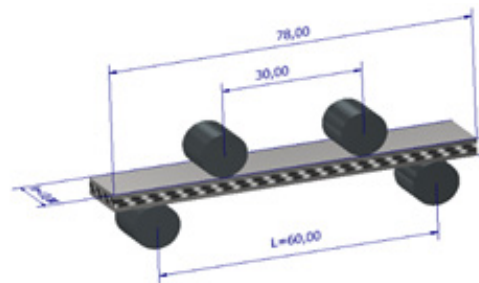


c. Định hướng sợi 45/45/45/45

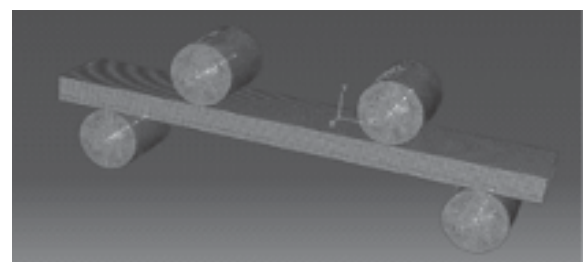


d. Định hướng sợi 0/90/90/0

Hình 1. Mô hình định hướng sợi trong CFRP



Hình 2. Mô hình mô phỏng tấm hybrid



Hình 3. Mô hình chia lưới trong phương pháp thử uốn 4 điểm

2.2.2. Mô hình hư hỏng cho tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

2.2.2.1. Mô hình hư hỏng tấm thép GB/T700

Thép GB/T700 đã áp dụng mô hình đàn hồi dẻo. Pha đàn hồi tuyến tính của thép được mô hình hóa như một điều kiện đẳng hướng, được xác định bởi mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của nó. Hơn nữa, thép GB/T700 dùng tiêu chuẩn hư hỏng dẻo để đánh giá sự hư hỏng ban đầu của nó. Sự hư hỏng được giả định xảy ra khi ε biến dạng dẻo tương đương là một hàm của tốc độ biến dạng và ứng suất 3 trục:

$$\omega_D = \int \frac{d\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_D^{pl}(\eta, \varepsilon^{pl})} = 1 \quad (1)$$

Trong đó $\eta = -p/q$, p là ứng suất nén, q là ứng suất tương đương Von Mises, và ω_D là biến trạng thái tăng đơn điệu theo biến dạng dẻo. Dựa vào lý thuyết cơ học hư hỏng liên tiếp, quá trình phát triển hư hỏng như sau:

$$\sigma = D^{el}/(\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (2)$$

$$D^{el} = (1-d) D_0^{\varepsilon L} \quad (3)$$

Trong đó, $D_0^{\varepsilon L}$ là độ cứng đàn hồi ban đầu, D^{el} là độ cứng sau khi hiệu suất suy giảm và ε^{pl} là sự biến dạng dẻo tương đương tại bất kỳ thời điểm nào. Biến hư hỏng độ cứng d thay đổi từ 0 đến 1, tiêu biểu cho bắt đầu hư hỏng đến nứt hoàn toàn.

2.2.2.2. Mô hình hư hỏng tấm CFRP theo tiêu chuẩn Hashin

Tiêu chuẩn Hashin là một mô hình hư hỏng từng bước dựa trên ứng suất. Mô hình này đưa ra giả thiết rằng vật liệu vẫn có một số khả năng chịu lực ngay cả sau khi hư hỏng xảy ra và

xem xét sự tác động cắt vào sự đứt gãy kéo sợi và nền. Tiêu chuẩn Hashin dự đoán 4 phương thức hư hỏng khác nhau: hư hỏng kéo sợi, hư hỏng nén sợi, hư hỏng kéo nền, và hư hỏng nén nền. Do đó, việc đánh giá mức độ hư hỏng sẽ chính xác hơn:

$$F_{ft} = \frac{\sigma_{11}^2}{X_T^2} + \alpha \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \right)^2 = 1 \quad (\sigma_{11} \geq 0) \quad (4)$$

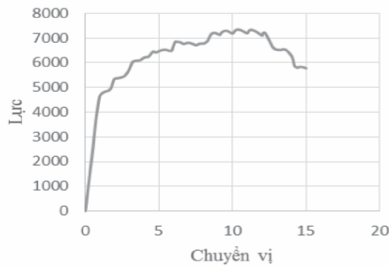
$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 = 1, \quad (\sigma_{11} < 0) \quad (5)$$

$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T^2} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0) \quad (6)$$

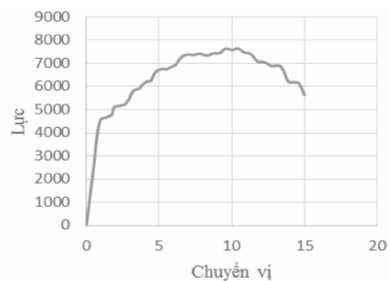
$$F_{mc} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} = 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0) \quad (7)$$

F_{ft} , F_{fc} , F_{mt} , F_{mc} tiêu biểu cho hư hỏng kéo sợi, hư hỏng nén sợi, hư hỏng kéo nền, và hư hỏng nén nền. σ tiêu biểu cho ứng suất hướng lên của mỗi bên, trong đó chữ số mũ T biểu thị hướng kéo, C biểu thị hướng nén. Y tiêu biểu cho độ bền theo hướng của sợi, X tiêu biểu cho độ bền theo hướng của nền, và S tiêu biểu cho độ bền cắt mỗi bên.

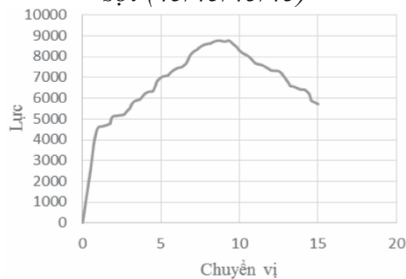
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



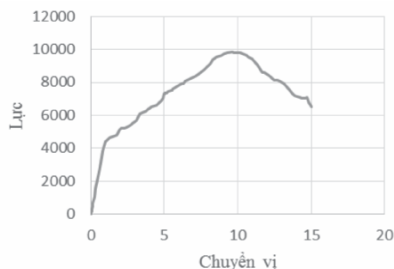
a. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (0/0/0/0)



b. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (45/45/45/45)



c. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (90/90/90/90)



d. Biểu đồ Lực – chuyển vị tấm hybrid định hướng sợi (0/90/90/0)

Hình 4. Biểu đồ Lực – chuyển vị của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Hình 4 trình bày đường cong Lực – chuyển vị của các tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) khi chịu tải uốn bốn điểm với các cấu hình định hướng sợi khác nhau trong lớp lõi CFRP bao gồm [0/0/0/0], [45/45/45/45], [90/90/90/90], và [0/90/90/0]. Cả bốn cấu hình đều thể hiện một giai đoạn đàn hồi tuyến tính ban đầu, tiếp theo là sự phát triển phi tuyến của hư hỏng, dẫn đến tải trọng cực đại và suy giảm tải sau cực đại.

Giai đoạn 1: Đàn hồi tuyến tính (linear elastic) – Cả lớp thép và CFRP chịu tải mà không có hư hỏng đáng kể. Trong giai đoạn này, tấm hybrid vẫn duy trì tính chất đàn hồi của cả lớp thép và lớp CFRP. Mỗi lớp vật liệu trong tấm hybrid sẽ phản ứng theo cách riêng của nó, nhưng tổng thể cấu trúc vẫn ở trạng thái đàn hồi.

Giai đoạn 2: Phát triển hư hỏng phi tuyến – Sau khi vượt qua giai đoạn đàn hồi, tấm hybrid bắt đầu chuyển sang giai đoạn phi tuyến, nơi sự phát triển hư hỏng bắt đầu xuất hiện. Cả lớp CFRP và thép có thể có hư hỏng, nhưng cơ chế hư hỏng giữa các lớp này sẽ khác nhau:

- CFRP: Do tính chất composite của lớp CFRP, hư hỏng ma trận và tách lớp có thể bắt đầu hình thành trong giai đoạn này. Hư hỏng do cắt hoặc nứt ma trận có thể xuất hiện tại các interface giữa các lớp sợi, đặc biệt nếu có sự tương tác của cắt liên lớp.

- Thép: Lớp GB/T700 có thể bắt đầu biến dạng dẻo trong giai đoạn này, với sự xuất hiện của các vết nứt hoặc hư hỏng do trượt. Tuy nhiên, thép thường bền hơn trong giai đoạn này so với CFRP và có thể vẫn giữ được một phần khả năng chịu tải.



Giai đoạn 3: Tải cực đại và suy giảm tải
– Trong giai đoạn này, tấm hybrid sẽ đạt được tải trọng cực đại (peak load) và sau đó suy giảm tải do sự phát triển mạnh mẽ của hư hỏng và phá hủy cấu trúc do hư hỏng cắt.

So sánh giữa các đường cong cho thấy định hướng sợi ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu uốn, đặc biệt là về lực cực đại, khả năng hấp thụ năng lượng và cơ chế phá hủy.

- Cấu hình sợi đơn hướng [0/0/0/0] thể hiện lực cực đại tương đối trung bình (7335.035N), do các sợi được bố trí song song với trục dọc của mẫu thử. Dù cấu trúc này cung cấp độ cứng cao theo phương trục, nó lại thiếu khả năng kháng ứng suất cắt ngang khi uốn, dẫn đến hiện tượng phá hủy sớm và phản ứng giòn như thấy ở Hình 5a.

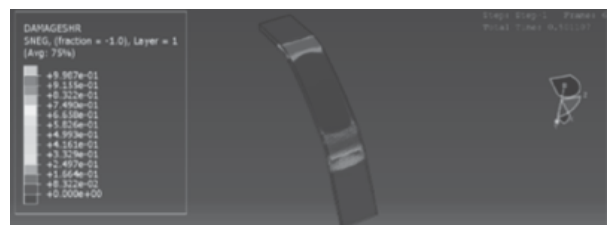
- Cấu hình sợi định hướng [45/45/45/45] cho thấy hiệu suất cải thiện nhẹ so với [0/0/0/0] tương ứng với lực cực đại là 7401.297, với khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn nhờ khả năng biến dạng cắt tốt hơn và ứng suất phân bố đều hơn giữa các lớp như thấy ở Hình 5b. Tuy nhiên, do tất cả các lớp đều nằm ở $\pm 45^\circ$, độ cứng theo phương uốn vẫn còn hạn chế.

- Đáng chú ý, cấu hình [90/90/90/90] cho lực cực đại (8752.8 N) cao hơn so với hai cấu hình trước. Kết quả này được lý giải bởi khả năng truyền ứng suất cắt hiệu quả hơn và sự kìm hãm biến dạng ngang tốt hơn, khi các sợi 90° hoạt động hiệu quả trong việc kháng lại ứng suất lệch mặt phẳng trong cấu trúc hybrid. Hư hỏng do cắt thấy ở Hình 5c.

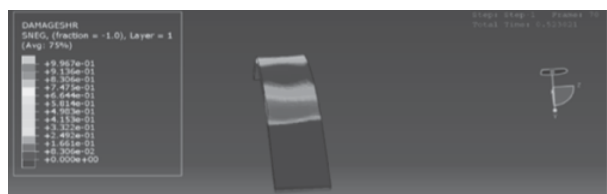
- Cấu hình gần đối xứng [0/90/90/0] cho thấy độ bền uốn cao nhất (9838.16N), cho thấy lợi thế rõ rệt của việc phối hợp nhiều hướng sợi. Cấu trúc này cung cấp độ cứng cân bằng,

khả năng truyền ứng suất cắt tốt và làm chậm sự lan truyền vết nứt nhờ sự tương tác giữa các sợi dọc và ngang. Sự hư hỏng do cắt thấy ở Hình 5d.

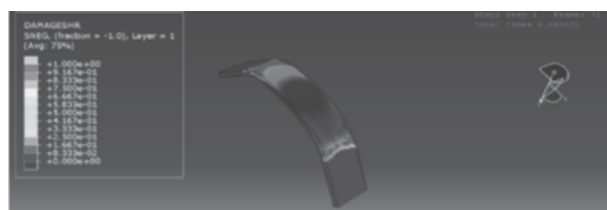
Từ đây, chúng ta thấy rõ tấm thép ngoài đóng vai trò gia cường độ cứng và bảo vệ khỏi phá hủy sớm, nên cơ chế phá hủy phụ thuộc nhiều vào cách lớp CFRP phản ứng bên trong. Hướng sợi CFRP ảnh hưởng lớn đến khả năng truyền và phân phối ứng suất giữa thép và composite, từ đó nó quyết định độ bền uốn tổng thể. Cấu hình định hướng sợi [0/90/90/0] trong CFRP của vật liệu tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) giúp tối ưu hóa sự phối hợp giữa các lớp, đặc biệt là khả năng kháng cắt, lan truyền nứt và hấp thụ năng lượng trong vùng chịu uốn lớn.



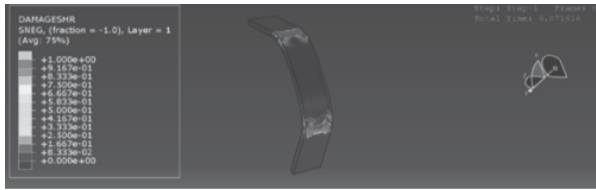
a. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (0/0/0/0)



b. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (45/45/45/45)



c. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (90/90/90/90)



d. Vùng bị phá hủy cắt của CFRP định hướng sợi (0/90/90/0)

Hình 5. Sự phá hủy cắt của các tấm CFRP

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khảo sát hành vi uốn của các tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/ (GB/T700) với bốn cấu hình định hướng sợi khác nhau dưới thử nghiệm uốn bốn điểm. Kết quả cho thấy định hướng sợi có ảnh hưởng quan trọng đến khả năng chịu tải, sự phát triển hư hỏng và khả năng hấp thụ năng lượng của vật liệu.

Trong các cấu hình thử nghiệm, tấm hybrid xếp lớp chéo (0°/90°/90°/0°) thể hiện tải trọng cực đại cao nhất 9838.16N, nhờ sự kết hợp giữa sợi 0° chịu tải chính và sợi 90° giúp kháng cắt, ngăn ngừa sự phát triển vết nứt xuyên thấu. Tấm đồng phương (0°/0°/0°/0°), mặc dù có độ cứng ban đầu cao, nhưng lại có tải trọng cực đại thấp và phá hủy giòn, do thiếu khả năng phân tán ứng suất. Cấu hình (45°/45°/45°/45°) mặc dù không có sợi song song trực tiếp với phương uốn, nhưng lại cho khả năng chịu tải cao hơn tấm đồng phương (0°/0°/0°/0°), đồng thời có độ chuyển vị thấp hơn. Điều này là do hướng sợi chéo tăng cường khả năng kháng cắt giữa các lớp, giúp phân tán ứng suất hiệu quả và hạn chế biến dạng uốn lớn, tuy nhiên lại dẫn đến độ cứng tương đối cao sau giai đoạn đàn hồi, làm giảm chuyển vị tối đa. Tấm hybrid định hướng sợi (90°/90°/90°/90°) mặc dù có tải trọng cực đại khá cao, nhưng khả năng chịu lực thấp hơn so với tấm hybrid được định hướng sợi (0°/90°/90°/0°) và bị giới hạn bởi cơ chế phá hủy chủ yếu do ma trận.

Những phát hiện này chỉ ra rằng việc chọn lựa cấu hình định hướng sợi thích hợp trong tấm hybrid có thể tối ưu hóa hiệu suất uốn, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu khả năng chịu tải cao.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 20/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Vlot, A. (2001), "Impact loading on fibre metal laminates". International Journal of Impact Engineering, 27(10), 987-1001.
- [2]. Alderliesten, R. C. (2017), "Fatigue and damage tolerance of fibre metal laminates". International Journal of Fatigue, 103, 345-359.
- [3]. Asundi, A., & Choi, A. Y. (1997), "Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft". Journal of Materials Processing Technology, 63(1-3), 384-394.
- [4]. Urdaneta, G., Alfano, M., & Pagnotta, L. (2021), "Experimental and numerical study of flexural behavior in hybrid CFRP-steel laminates". Composite Structures, 262, 113640.
- [5]. Raju, K. R. C., Rao, T. S., & Reddy, Y. R. (2017), "Flexural and tensile behavior of metal-carbon fiber hybrid laminates". Materials Today: Proceedings, 4(2), 3374-3380.
- [6]. Gürkan, H., & Korkmaz, M. E. (2020), "The effect of fiber orientation on the flexural behavior of CFRP laminates". Composites Part B: Engineering, 199, 108217.
- [7]. Maimí, P., Camanho, P. P., Mayugo, J. A., & Dávila, C. G. (2007), "A continuum damage model for composite laminates: Part I – Constitutive model". Mechanics of Materials, 39(10), 897-908.

NGHIÊN CỨU SỐ TRẠNG THÁI UỐN 4 ĐIỂM TẮM HYBRID (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) SỬ DỤNG TIÊU CHÍ PHÁ HỦY HASHIN

NUMERICAL INVESTIGATION OF FOUR – POINT BENDING BEHAVIOR IN
(GB/T700)/CFRP/(GB/T700) HYBRID LAMINATES USING HASHIN FAILURE
CRITERIA

ThS. **Bùi Chấn Thanh**, ThS. **Dương Lê Hùng**

Khoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Email: bcthanh@ntt.edu.vn; dlhung@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày một phân tích số về ứng xử uốn bốn điểm của lớp vật liệu hybrid Thép/polyme cốt sợi carbon/Thép (GB/T700)/CFRP/GB(T700) bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong Abaqus. Mục tiêu là đánh giá phản ứng cơ học và cơ chế phá hủy của kết cấu hybrid dưới tải trọng uốn, chỉ xét tiêu chí phá hủy Hashin. Các lớp composite được mô hình hóa bằng mô hình hư hỏng dị hướng, dựa trên sự khởi đầu phá hủy theo Hashin, sau đó là suy giảm độ cứng tiến triển. Các lớp thép được mô phỏng bằng mô hình đàn hồi-dẻo có xét đến hóa bền biến dạng. Phân tích cung cấp cái nhìn sâu sắc về phân bố ứng suất, khởi đầu phá hủy và tiến triển hư hỏng trong lớp tấm. Kết quả cho thấy hư hỏng do kéo và nén của sợi chiếm ưu thế trong các vùng có ứng suất cao, trong khi nứt ma trận xảy ra dưới tải trọng cắt và ngang. Đáp ứng tải-chuyển vị và cơ chế phá hủy cuối cùng được xem xét để hiểu rõ độ bền kết cấu và quá trình phát triển hư hỏng. Dự đoán số cho thấy FEM có hiệu quả trong việc mô phỏng hành vi phá hủy của vật liệu lai. Nghiên cứu này đóng vai trò là nền tảng cho các nghiên cứu tương lai nhằm tối ưu hóa thiết kế tấm lai.

Từ khóa: Vật liệu lai; Uốn bốn điểm; Phân tích phần tử hữu hạn; Tiêu chí phá hủy Hashin; Abaqus.

ABSTRACT

This study presents a numerical investigation of the four-point bending behavior of hybrid steel/carbon fiber reinforced polymer/steel (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) hybrid laminates using the finite element method (FEM) in Abaqus. The objective is to evaluate the mechanical response and failure mechanisms of the hybrid structure under bending loads, considering only Hashin failure criteria. The composite layers are modeled using an anisotropic damage model based on Hashin failure initiation, followed by progressive stiffness degradation. The steel layers are simulated with an elasto-plastic model incorporating strain hardening. The analysis provides insights into stress distribution, failure initiation, and progressive damage within the laminate. Results indicate that fiber tensile and compressive failure dominate in high-stress regions, while matrix cracking occurs under shear and transverse loading. The load-displacement response and ultimate failure mode are examined to understand structural integrity and failure evolution. Numerical predictions highlight the effectiveness of FEM in capturing failure behavior in hybrid laminates. This study serves as a basis for future research on optimizing hybrid laminate designs.

Keywords: Hybrid laminates; Four-point bending; Finite element analysis; Hashin failure criterion; Abaqus.

1. GIỚI THIỆU

Các vật liệu tấm hybrid, đặc biệt là kết cấu các tấm hybrid giữa các tấm kim loại và composite tăng cường bởi sợi đã thu hút sự quan tâm đáng kể trong các ứng dụng hàng không vũ trụ, ô tô và kết cấu nhờ tỷ lệ bền trên khối lượng cao, khả năng chống ăn mòn và các tính chất cơ học có thể điều chỉnh [1, 2]. Các lớp tấm này kết hợp độ cứng và độ bền cao của CFRP với độ dẻo và khả năng chịu hư hỏng của kim loại, khiến chúng trở thành lựa chọn lý tưởng cho các ứng dụng chịu tải [3]. Tuy nhiên, việc dự đoán phản ứng cơ học và cơ chế phá hủy của chúng vẫn là một thách thức do sự tương tác phức tạp giữa các lớp kim loại và composite. Một trong những cơ chế phá hủy quan trọng của vật liệu tấm lai là hư hỏng sợi và ma trận, có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kết cấu. Nhiều tiêu chí phá hủy, chẳng hạn như Tsai-Wu, Puck và Hashin, đã được phát triển để dự đoán sự phá hủy của composite [4, 5]. Trong số đó, tiêu chí phá hủy Hashin được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng phân biệt các chế độ hư hỏng của sợi và ma trận dưới các điều kiện tải khác nhau [6]. Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá ứng xử uốn bốn điểm

của tấm lai (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) bằng tiêu chí phá hủy Hashin trong khuôn khổ phần tử hữu hạn. Khác với các nghiên cứu trước đây sử dụng mô hình vùng liên kết (CZM) để đánh giá hiện tượng tách lớp [7], nghiên cứu này giả định liên kết hoàn hảo giữa các lớp và chỉ xem xét sự khởi đầu và tiến triển hư hỏng trong các lớp composite.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Vật liệu CFRP được sử dụng trong mô phỏng là composite sợi carbon T700, được sản xuất bởi Toray, Tokyo, Nhật Bản, với độ dày 2 mm. Một loại nhựa prepreg tiêu chuẩn với hàm lượng nhựa 38% được sử dụng trong nghiên cứu này. Các tính chất cơ học của CFRP được trình bày trong Bảng 1, trong đó E_1 là mô đun đàn hồi theo phương dọc, E_2 là mô đun đàn hồi theo phương ngang, ν là hệ số Poisson, và G là mô đun cắt. Các tấm thép GB/T700 cacbon thấp, được biết đến với độ dẻo cao, được lựa chọn với độ dày 1 mm và các tính chất cơ học của chúng được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 1. Các tính chất vật liệu của CFRP (T700)

Density (Kg/cm ³)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	μ_{12}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
1560	130	8	0.28	4.5	4.5	3.6

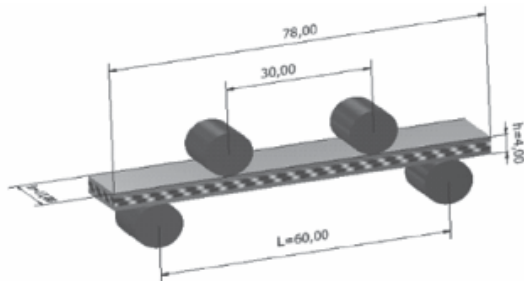
Bảng 2. Các tính chất vật liệu của GB/T700

Density (g/cm ³)	Elastic modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Possion's ratio ν
7.85	210	450	235	0.3



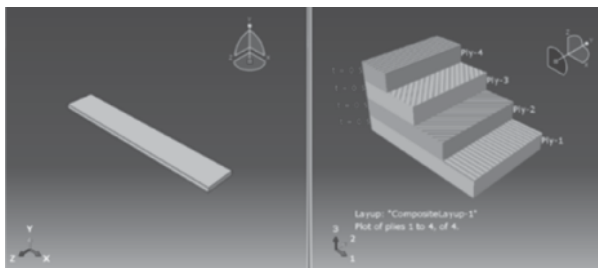
2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Mô hình phần tử hữu hạn

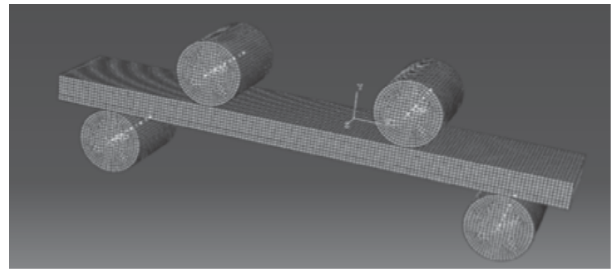


Hình 1. Mô hình mô phỏng uốn 4 điểm theo tiêu chuẩn D7264

Tấm hybrid bao gồm tấm composite CFRP xen vào giữa 2 tấm GB/T700. Mô hình hình học mô phỏng tuân theo kích thước tiêu chuẩn D7264 để tăng độ chính xác. Tấm hybrid có chiều dài 78 mm, chiều rộng 13 mm và chiều dày 2 mm. Khoảng cách giữa hai điểm hỗ trợ là $L = 60$ mm, như được thấy trong Hình 1. Cấu trúc tấm hybrid bao gồm một lớp CFRP dày 2 mm và một lớp thép GB/T700 dày 1 mm. Lớp CFRP bao gồm bốn lớp prepreg được định hướng sợi $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$, mỗi lớp có độ dày 0,5 mm, như được thể hiện trong Hình 2. Lưới mạng tính vi được áp dụng, sử dụng phần tử C3D8R cho thép GB/T700 và phần tử SC8R cho CFRP, phần tử R3D4 cho các điểm hỗ trợ và mũi tải. Mật độ lưới được tối ưu hóa để cân bằng độ chính xác và hiệu quả tính toán, như thể hiện trong Hình 3.



Hình 2. Mô hình định hướng sợi của mỗi lớp prepreg trong tấm CFRP



Hình 3. Mô hình chia lưới trong phương pháp thử uốn 4 điểm

2.2.2. Điều kiện biên và tải

Một thiết lập uốn bốn điểm được thực hiện với điều kiện biên hỗ trợ đơn giản. Một tải trọng điều khiển dịch chuyển được áp dụng tại tâm 2 phần tử hỗ trợ đặt phía trên mẫu, theo tiêu chuẩn D7264. Các điểm hỗ trợ và mũi tải được mô phỏng như các vật thể cứng để giảm thiểu lỗi tính toán. Tiếp xúc mặt - mặt được áp dụng giữa tấm, mũi tải và các điểm hỗ trợ, và thuộc tính tiếp xúc bình thường được đặt là tiếp xúc cứng, thuộc tính tiếp xúc tiếp tuyến được đặt với hệ số hàm phạt là 0,25.

2.2.3. Mô hình hư hỏng cho tấm lai (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Mô hình hỏng kết hợp tiêu chí hỏng Hashin cho lớp CFRP và tiêu chí hỏng dẻo cho các lớp thép GB/T700 để dự đoán hư hỏng tiến triển dưới tải trọng uốn.

2.2.3.1. Tiêu chuẩn hư hỏng Hashin cho lớp CFRP

Mô hình hư hỏng Hashin được dùng để dự đoán phương thức hư hỏng trong lớp CFRP:

✓ Hư hỏng kéo sợi ($\sigma_{11} > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

✓ Hư hỏng nén sợi ($\sigma_{11} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

✓ Hư hỏng kéo nền ($\sigma_{22} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

✓ Hư hỏng nén nền ($\sigma_{22} < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

2.2.3.2. Tiêu chí hư hỏng dẻo cho tấm GB/T700

Tiêu chí hỏng dẻo được sử dụng để dự đoán biến dạng dẻo và nứt trong các lớp thép. Hỏng xảy ra khi biến dạng dẻo tương đương ($\bar{\epsilon}_p$) đạt đến một giá trị tiêu chuẩn ($\bar{\epsilon}_p^f$):

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_p^f} \frac{d\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_p^f} \geq 1 \quad (5)$$

Trong đó:

- $\bar{\epsilon}_p$ là độ biến dạng;

- $\bar{\epsilon}_p^f$ là biến dạng hư hỏng;

- Tích phân đại diện cho sự tích tụ hư hỏng, dẫn đến nứt dẻo khi tiêu chí này được thỏa mãn.

Ngoài ra, tiêu chí chịu kéo Von Mises được sử dụng để xác định sự bắt đầu của biến dạng dẻo:

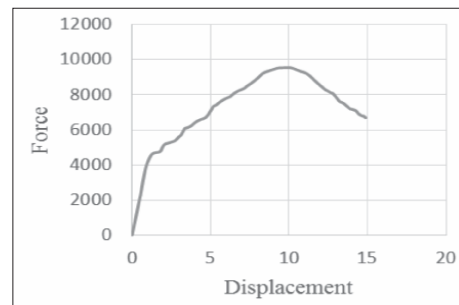
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \geq \sigma_y \quad (6)$$

Trong đó:

- σ_{eq} là ứng suất tương đương Von Mises;
- S_{ij} là tensor ứng suất lệch;
- σ_y là ứng suất chảy của thép GB/T700.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi chỉ thảo luận về kết quả mô phỏng thử nghiệm độ bền uốn bốn điểm của vật liệu tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700). Vật liệu tấm lai bao gồm hai tấm thép GB/T700 và một lớp CFRP được tạo thành từ bốn lớp prepreg với định hướng sợi như thể hiện trong Hình 2. Sự khác biệt về mô-đun đàn hồi và độ bền giữa thép GB/T700 và CFRP dẫn đến hành vi cơ học khác nhau.



Hình 4. Đường cong lực - chuyển vị của tấm hybrid khi thử uốn 4 điểm

Từ đồ thị ở Hình 4, chúng ta thấy rằng trong quá trình chịu tải trọng uốn 4 điểm tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) trải qua ba giai đoạn biến dạng riêng biệt rõ rệt: biến dạng đàn hồi, đạt ứng suất cực đại, và suy giảm sau đỉnh.

Giai đoạn 1: Ứng xử đàn hồi tuyến tính. Lực tăng tỷ lệ thuận với chuyển vị. Điều này cho thấy tấm laminate tổ hợp đang làm việc trong vùng đàn hồi, tuân theo định luật Hooke. Trong giai đoạn này, cả thép GB/T700 và CFRP đều cùng tham gia chịu tải, và chưa xảy ra hư hỏng hay biến dạng đáng kể. Vật liệu thể hiện độ cứng cao nhờ sự kết hợp giữa lớp CFRP và

lớp thép, điều đó xác nhận rằng kết cấu vẫn ổn định và chưa bị hư hỏng, với phân bố ứng suất đều trên toàn bộ tấm laminate.

Giai đoạn 2: Tiếp tục đặt tải, độ dốc đường cong giảm dần không còn tuyến tính. Vật liệu bắt đầu xuất hiện vi hư hỏng: thép GB/T700 bắt đầu chảy dẻo, nứt ma trận, đứt sợi ở một vài vị trí trong tấm CFRP. Tấm vật liệu không còn làm việc hoàn toàn đàn hồi, và hư hỏng bên trong bắt đầu tích tụ.

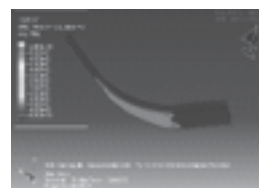
Giai đoạn 3: Khi lực đạt đến giá trị cực đại 9553.67N và chuyển vị 9.797mm tấm CFRP bị hư hỏng đứt sợi, nứt nền hoàn toàn làm khả năng chịu tải của tấm hybrid giảm xuống, vật liệu không còn khả năng chịu tải thêm một cách hiệu quả. Lực giảm từ từ trong giai đoạn này cho thấy quá trình hư hỏng lan rộng chứ không xảy ra một cách đột ngột như phá hủy giòn. Lớp thép vẫn tiếp tục chịu một phần tải trọng, ngay cả khi CFRP bắt đầu xuống cấp.



Hình 5. Biểu đồ phân bố ứng suất dọc của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700)

Hình 5 trình bày phân bố ứng suất dọc theo chiều dài của tấm hybrid tại thời điểm phá hủy. Trong quá trình chịu tải uốn bốn điểm, lớp thép GB/T700 phía trên chịu ứng suất nén do tiếp xúc trực tiếp với đầu ép, phù hợp với cơ chế truyền lực trong bài toán uốn. Ngược lại, lớp thép GB/T700 phía dưới chủ yếu chịu ứng suất kéo, phản ánh đặc điểm đối xứng của trạng thái ứng suất uốn điển hình khi lực tác dụng gây cong tấm xuống dưới.

Đối với lớp CFRP nằm giữa, phân bố ứng suất cho thấy sự phân cực rõ rệt: nửa trên của lớp composite chịu nén, trong khi nửa dưới chịu kéo. Sự chênh lệch lớn về mô đun đàn hồi giữa các lớp thép và CFRP dẫn đến dịch chuyển mặt trung hòa khỏi trung tâm hình học của cấu trúc laminate, từ đó tạo nên phân bố ứng suất phi đối xứng trong lớp composite. Cơ chế này đóng vai trò quan trọng trong việc xác định vùng khởi phát phá hủy và sự phát triển vết nứt bên trong vật liệu.



a. Hư hỏng kéo sợi theo tiêu chuẩn Hashin



b. Hư hỏng nén sợi theo tiêu chuẩn Hashin



c. Hư hỏng kéo nền theo tiêu chuẩn Hashin

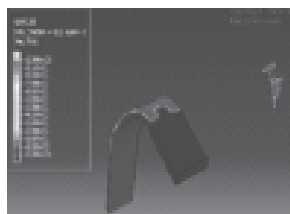


d. Hư hỏng nén nền theo tiêu chuẩn Hashin

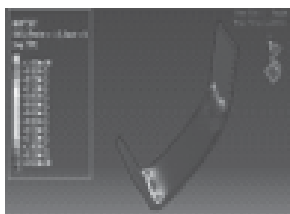
Hình 6. Trạng thái hư hỏng CFRT theo tiêu chuẩn Hashin

Hình 6 minh họa các vị trí xuất hiện hư hỏng ban đầu trong tấm hybrid, chủ yếu tập trung ở lớp CFRP theo tiêu chí phá hủy Hashin.

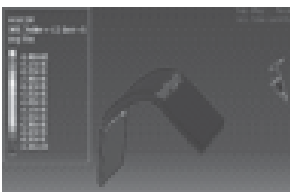
Cụ thể, Hình 6a cho thấy phá hủy sợi do kéo bắt đầu xuất hiện tại một số vị trí trên lớp prepreg thứ tư của tấm CFRP, nơi chịu ứng suất kéo lớn tại chuyển vị $U = 5.061\text{mm}$. Hình 6b thể hiện phá hủy sợi do nén khởi phát tại một số vị trí trên lớp prepreg thứ nhất, khi lớp này chịu ứng suất nén cao tại chuyển vị $U = 7.552\text{mm}$. Khi chuyển vị đạt tới $U = 7.008\text{mm}$ thì xuất hiện phá hủy nền do kéo ở một số vị trí của lớp prepreg thứ tư trong nền ma trận CFRP. Ngược lại, hình 6d cho thấy phá hủy nền do nén bắt đầu xuất hiện sớm hơn tại chuyển vị $U = 3.847\text{mm}$ điều này lý giải do tấm CFRP được định hướng không đối xứng ($0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ$) thì nền đóng vai trò mang tải chính theo phương ngang (vì sợi không hỗ trợ theo phương uốn chính). Khi đó, ứng suất trong nền tăng nhanh dẫn đến phá hủy sớm.



a. Hư hỏng đứt sợi hoàn toàn do kéo theo tiêu chuẩn Hashin



b. Hư hỏng đứt sợi không hoàn toàn do nén theo tiêu chuẩn Hashin



c. Hư hỏng đứt nền hoàn toàn do kéo theo tiêu chuẩn Hashin



d. Hư hỏng đứt sợi không hoàn toàn do nén theo tiêu chuẩn Hashin

Hình 7. Trạng thái hư hỏng CFRP hoàn toàn

Từ hình 7, chúng ta thấy rằng quá trình hư hỏng làm giảm độ bền uốn tấm hybrid chủ yếu là do kéo đứt sợi và kéo gãy nền như hình 7a và 7c, còn quá trình chịu nén CFRP rất tốt chưa gây hư hỏng hoàn toàn như thấy ở hình 7c.7d. Quá trình hư hỏng trên xảy ra đúng thời điểm lúc tấm hybrid chịu lực cực đại $P = 9553.67\text{N}$ và chuyển vị 9.797mm .

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này khảo sát ứng xử uốn của tấm hybrid (GB/T700)/CFRP/(GB/T700) dưới thử nghiệm uốn bốn điểm thông qua mô phỏng số. Kết quả cho thấy phản ứng cơ học của tấm có thể được chia thành ba giai đoạn rõ rệt: biến dạng đàn hồi, đạt ứng suất cực đại, và suy giảm sau đỉnh. Ở giai đoạn đầu, laminate biến dạng đàn hồi, với cả thép GB/T700 và lớp CFRP cùng đóng góp vào khả năng chịu tải. Khi tải trọng tăng dần, vật liệu đạt đến ứng suất cực đại là 9553.67N MPa , đánh dấu giới hạn về độ bền uốn kết cấu. Vượt qua điểm này, sự tích lũy hư hỏng dẫn đến giảm dần khả năng chịu tải của tấm.

Phân tích phân bố ứng suất cho thấy lớp thép phía trên và phần trên của lớp CFRP chịu ứng suất nén, trong khi phần dưới của lớp CFRP chịu ứng suất kéo. Cơ chế phá hủy tập trung chủ yếu tại lớp prepreg thứ tư của CFRP, nơi xuất hiện các dạng hỏng như: đứt sợi do kéo, hỏng sợi do kéo và phá hủy nền.



Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**

Ngày phản biện: **20/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ashrafi, B., Ghasemi, H., & Taheri, F. (2016), “*Mechanical performance of hybrid composite laminates reinforced with carbon and glass fibers*”. Composites Part B: Engineering, 105, 135-144.
- [2]. Kim, H., & Lee, D. G. (2012), “*Effect of hybridization on mechanical properties of composite laminates*”. Journal of Composite Materials, 46(7), 857-867.
- [3]. Zhang, D., Li, S., & Sun, G. (2019), “*Experimental and numerical investigation on hybrid CFRP/metal laminates under bending load*”. Materials & Design, 162, 57-68.
- [4]. Tsai, S. W., & Wu, E. M. (1971), “*A general theory of strength for anisotropic materials*”. Journal of Composite Materials, 5(1), 58-80.
- [5]. Puck, A., & Schürmann, H. (1998), “*Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models*”. Composites Science and Technology, 58(7), 1045-1067.
- [6]. Hashin, Z. (1980), “*Failure criteria for unidirectional fiber composites*”. Journal of Applied Mechanics, 47(2), 329-334.
- [7]. Camanho, P. P., & Davila, C. G. (2002), “*Mixed-mode decohesion finite elements for the NASA Technical*”. Report TM-2002-211737.

ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID CẢI TIẾN KẾT HỢP HỌC LẬP CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG QUAY CƠ ĐIỆN THỦY LỰC

IMPROVED PID CONTROL COMBINED WITH ITERATIVE LEARNING FOR ELECTRO-HYDRAULIC ROTARY ACTUATORS

Nguyễn Minh Trí

Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Email: nmtri@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này giới thiệu một phương pháp điều khiển mới cho việc theo dõi quỹ đạo trong bộ điều khiển điện thủy lực quay (EHRA), nổi bật với sự kết hợp của bộ điều khiển tỷ lệ tích phân đạo hàm (PID) đã chỉnh sửa với cơ chế học tập lặp lại. Mục tiêu là thực hiện nhiệm vụ điều khiển theo dõi thích ứng cho EHRA điều khiển bằng bơm đối xứng. Mặc dù bộ điều khiển PID thông thường được biết đến với độ bền vững và dễ sử dụng, chúng thường gặp khó khăn trong việc duy trì hiệu suất điều khiển tốt đối với các hệ thống có độ phi tuyến cao và các thông số động lực không xác định. Với việc cải tiến bộ điều khiển PID truyền thống với một cơ chế học tập lặp lại, cho phép điều khiển bám vị trí tốt hơn cho hệ EHRA hoạt động bởi bơm đối xứng. Hiệu quả của bộ điều khiển nâng cao này được xác nhận thông qua mô phỏng kết hợp phần mềm AMESim và MATLAB, làm nổi bật khả năng cải thiện độ chính xác điều khiển trong các ứng dụng thực tế.

Từ khóa: Hệ thống thủy lực; Bộ truyền động điện thủy lực xoay; Bộ điều khiển PID; Bộ điều khiển học tập lặp lại; Bộ điều khiển bám.

ABSTRACT

This research presents an effective control algorithm for trajectory tracking of Electro-Hydraulic Rotary Actuators (EHRA) that combines a non-linear modified Proportional-Integral-Derivative (PID) controller with an iterative learning scheme. The key feature of this study is intended to improve adaptive tracking performance for symmetrical pump-controlled EHRA. While conventional PID controllers are known for their robustness and simplicity, they often struggle with systems characterized by high nonlinearity and unknown dynamics. To resolve these issues, an iterative learning mechanism for periodic trajectory tracking is merged into the traditional PID structure. The results will be validated through various co-simulations performed in AMESim and MATLAB, proving the effectiveness of the control strategy compared to conventional PID control, having better performance.

Keywords: Hydraulic system; Electro – hydraulic rotary actuator; PID control; Iterative learning; Tracking control. 

1. GIỚI THIỆU

Các hệ thống thủy lực đã đóng một vai trò quan trọng trong ngành công nghiệp hiện đại nhờ tính bền bỉ, công suất lớn và độ tin cậy cao của chúng. Trong hầu hết các ứng dụng công nghiệp trước đây, các bộ truyền động thủy lực thường được vận hành thông qua các hệ thống điều khiển van (VHS) đã được sử dụng như các thiết bị cung cấp công suất cho nhiều ứng dụng nhờ khả năng tạo ra công suất rất lớn so với kích thước của chúng [1]. Tuy nhiên, VHS gặp phải một số vấn đề như ô nhiễm môi trường do rò rỉ chất làm việc, gánh nặng bảo trì, khối lượng nặng và không gian lắp đặt hạn chế [2]. Để khắc phục những hạn chế của hệ thống VHS, các hệ thống chấp hành điện thủy lực (EHA) đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong những năm gần đây. Mỗi EHA được coi như một hệ thống chuyển đổi công suất, chuyển từ tốc độ cao của động cơ điện sang lực lớn của xy lanh thủy lực. Nói chung, một hệ thống EHA bao gồm động cơ điện, bơm hai chiều, các van, bể chứa và bộ một xy lanh. Vì bộ chấp hành cuối được điều khiển trực tiếp bởi hoạt động của bơm cung cấp, các hệ thống EHA tạo lực mạnh mẽ với thiết kế gọn, sạch sẽ, hiệu quả năng lượng cao, và độ ổn định hơn so với VHS [3]. Các bộ chấp hành quay thủy lực (RAs) được ứng dụng phổ biến trong công nghiệp hiện đại, chẳng hạn như trong máy công cụ, rô-bốt, thiết bị vận chuyển, máy uốn ống, máy uốn tấm... ở những nơi đòi hỏi tải trọng lớn và momen xoắn cao.

Đối với các hệ thống điện thủy lực quay (EHRA) điều khiển bằng bơm, các vấn đề điều khiển còn gặp nhiều thách thức hơn hệ thống điều khiển van. Do phải xem xét cùng nhau các hành vi động lực của bơm hai chiều, van cùng với xi lanh xoay thủy lực. Để có được khả năng điều khiển bám sát vị trí cho một hệ EHRA dựa

trên chiều và vận tốc bơm, bộ điều khiển như PID truyền thống (tỷ lệ – tích phân – vi phân), PID mờ [4] đã được áp dụng. Tuy nhiên, bộ điều khiển PID không thể đạt được hiệu suất hợp lý dưới nhiều điều kiện tải khác nhau vì các hệ số điều khiển là không thay đổi. Do sự phát triển của cấu trúc điều khiển mờ phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm của chuyên gia, những bộ điều khiển PID mờ này có thể không đủ đáng tin cậy trong một số ứng dụng. Bài báo này trình bày sự phát triển của một phương pháp điều khiển bám vị trí mới được ứng dụng trong môi trường công nghiệp. Hệ thống truyền động được xây dựng dựa trên EHRA thương mại của Bosch Rexroth kết hợp với xy lanh thủy lực xoay KNR.

Với bộ điều khiển PID truyền thống được sử dụng để tính toán chỉnh sửa tín hiệu điều khiển, trong khi một cơ chế học tập lặp lại được áp dụng để thực hiện thích ứng trong hiệu suất theo dõi. Lý thuyết học lặp lại lần đầu tiên được giới thiệu bởi Arimoto et al. vào năm 1984 [5], [6]. Lý thuyết lặp lại là một trong những lược đồ học tập tốt cho việc theo dõi các quỹ đạo định kỳ và đã được áp dụng trong một số lĩnh vực như robot, sản xuất, hệ thống điều khiển, v.v. Trong bài báo này, sự kết hợp của học tập lặp lại và thuật toán PID lần đầu tiên được áp dụng vào nhiệm vụ điều khiển bám vị trí của một hệ thống EHRA điều khiển bằng bơm. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm chuyên dụng AMESim và MATLAB với độ chính xác cao trong các điều kiện làm việc khác nhau hỗ trợ mạnh mẽ cho khả năng áp dụng phương pháp điều khiển được đề xuất trong các ứng dụng thủy lực hiện đại.

2. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Trong nghiên cứu này, để đạt được mục tiêu điều khiển, nghiên cứu tập trung vào việc

xác định lệnh tốc độ đầu vào của động cơ DC, ký hiệu là ω , nhằm đảm bảo đầu ra vị trí của hệ thống theo dõi quỹ đạo mong muốn với độ chính xác cao nhất. Sai số theo dõi được định nghĩa như sau:

$$d \triangleq y_d - y \quad (1)$$

Trong đó, y là vị trí thực tế của hệ thống.

Hệ thống điều khiển được thiết kế bao gồm ba thành phần chính: (i) Bộ điều khiển PID, (ii) Bộ điều khiển học tập lặp lại, và (iii) Giải thuật điều chỉnh tham số dựa trên dự báo mờ.

2.1. Bộ điều khiển PID

Bộ điều chỉnh tín hiệu điều khiển trong bài báo này được tính toán bởi bộ điều khiển PID thông thường:

$$\omega^* \triangleq K_p e + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int e dt \quad (2)$$

Với K_p , K_i , K_d là các hệ số điều khiển của bộ điều chỉnh.

2.2. Bộ điều khiển học tập lặp lại

Áp dụng giải thuật điều khiển học tập lặp lại, tín hiệu điều khiển của hệ thống EHRA trong lần lặp thứ k^{th} được định nghĩa như sau:

$$\omega_{(k)} = \Gamma \omega_{(k-1)} + \omega_{(k)}^* \quad (3)$$

Γ là hệ số thích nghi, $\omega_{(k-1)}$ là lần lặp trước, và $\omega_{(k)}^*$ là thông số sửa đổi của tín hiệu điều khiển. Hệ số thích nghi của bộ điều khiển được cập nhật như sau:

$$\Gamma_k = \Gamma_{(k-1)} + \alpha |e| \quad (4)$$

Trong đó, α là hệ số thích nghi, $|e|$ là sai số tuyệt đối.

2.3. Giải thuật dự báo mờ

Nhằm nâng cao khả năng thích ứng của bộ điều khiển, một mô hình dự báo sai số đơn giản được sử dụng:

$$e_{pred} = e + \tau \frac{de}{dt} \quad (5)$$

với τ là thời gian dự báo.

Các hệ số K_p , K_i , K_d được điều chỉnh dựa vào hệ thống mờ với đầu vào e_{pred} và $\frac{de}{dt}$:

$$K_p = K_{p0} + f_1(e_{pred}, \dot{e}) \quad (6)$$

$$K_i = K_{i0} + f_2(e_{pred}, \dot{e}) \quad (7)$$

$$K_d = K_{d0} + f_3(e_{pred}, \dot{e}) \quad (8)$$

Các hàm f_1 , f_2 , f_3 là các hàm điều chỉnh tham số điều khiển dựa trên sai số dự báo e_{pred} và đạo hàm sai số $\dot{e}$ được tính như sau:

$$f_1(e_{pred}, \dot{e}) = \lambda_1 \tanh(\gamma_1 e_{pred}) \quad (9)$$

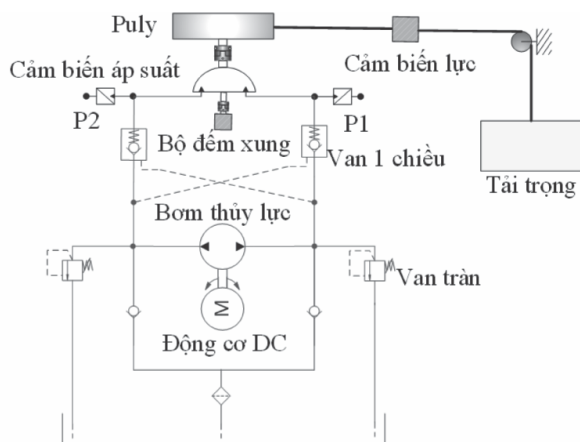
$$f_2(e_{pred}, \dot{e}) = \lambda_2 \text{sigmoid}(\gamma_2 e_{pred}) \quad (10)$$

$$f_3(e_{pred}, \dot{e}) = \lambda_3 \text{sign}(\dot{e}) \quad (11)$$

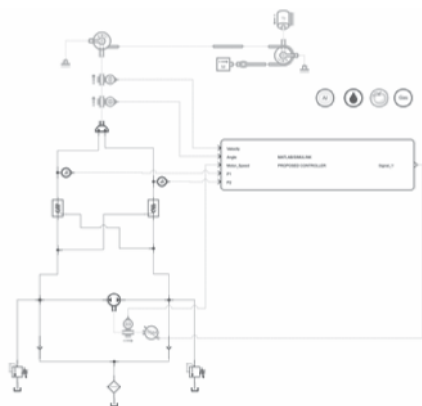
Với: λ_i , γ_i là các hệ số điều chỉnh.

Lưu ý rằng bộ điều khiển dựa trên học tập lặp lại được thiết kế chỉ cho các quỹ đạo mong muốn định kỳ. 

3. SƠ ĐỒ HỆ THỐNG THỦY LỰC



Hình 1. Cấu trúc hệ thống EHRA



Hình 2. Hệ thống điều khiển EHRA trên nền tảng đồng mô phỏng.

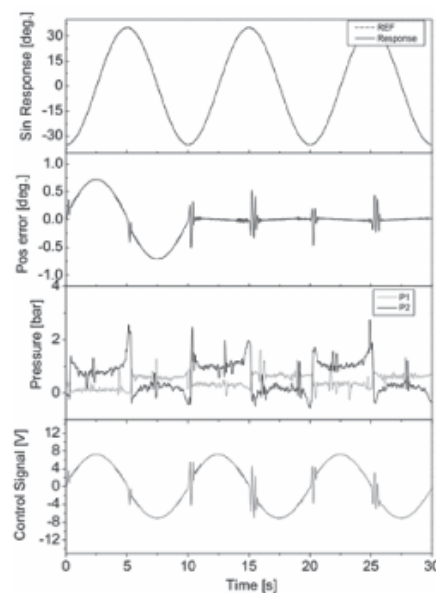
Hệ thống EHRA được xem xét trong bài báo này bao gồm bơm răng, hệ thống van hỗ trợ và một xy lanh xoay thủy lực đối xứng hai chiều. Toàn bộ hệ thống được dẫn động bởi một động cơ một chiều (DC motor) có điện áp 24V và dòng điện 20A. Ở cấu hình này, chuyển động của xy lanh xoay được điều chỉnh trực tiếp bằng tốc độ của động cơ servo. Một bộ mã hóa tuyến tính, hai cảm biến áp suất và một cảm biến lực được lắp đặt vào hệ thống để đo vị trí của xy lanh xoay, áp suất trong hai buồng chính của cơ cấu chấp hành điện thủy lực và lực tải tác động lên hệ thống. Phần giả lập tải là

một cơ cấu tải trọng trọng lực, có thể dễ dàng điều chỉnh lực tải. Đây là phương pháp đơn giản nhưng hiệu quả để mô phỏng sự thay đổi điều kiện làm việc của hệ thống truyền động EHRA. Cấu hình của EHRA được minh họa ở Hình 1. Các thông số cài đặt của hệ thống EHRA được trình bày trong Bảng 1, trong khi cấu trúc của hệ thống điều khiển trên nền tảng đồng mô phỏng được thể hiện như Hình 2.

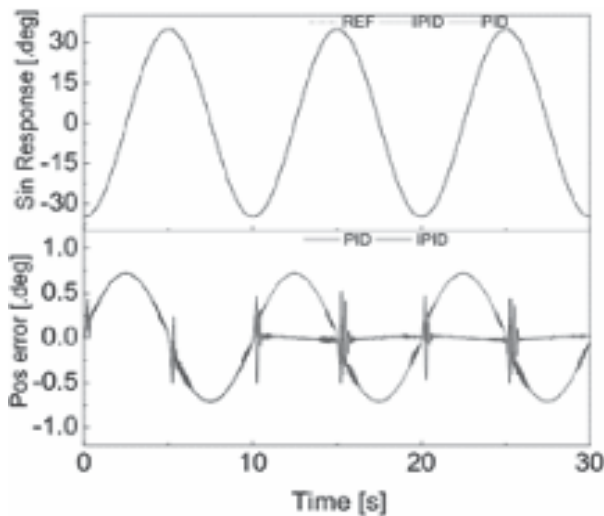
Bảng 1. Các thông số thiết bị

Thiết bị	Thông số	Giá trị
Bơm thủy lực	Dung tích	0.97 [cc/rev]
	Tốc độ xoay	3000 [rpm]
	Áp suất van tràn	120 [bar]
Xylanh thủy lực xoay	Dung tích	27.54 [cc/2700]
	Vòng xoay	100 [deg.]
	Lực sinh ra	120 [Nm]
Dầu thủy lực	Mô đun đàn hồi	1.5×10^9 [Pa]
	Trọng lượng riêng	0.87

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH



Hình 3. Phản hồi của hệ thống đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.1Hz, điều kiện không tải.



Hình 4. So sánh đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.1Hz, điều kiện không tải.

Các mô phỏng được tiến hành và kết quả so sánh được thể hiện trong các đồ thị từ Hình 3 đến Hình 6. Các đồ thị này hiển thị sự thay đổi về vị trí của xy lanh xoay tương ứng với các bộ điều khiển khác nhau trong các trường hợp nghiên cứu ứng với hàm mục tiêu dạng sóng hình sin (có tần số thay đổi từ 0.1 Hz đến 0.2 Hz).

Để đánh giá bộ điều khiển đã thiết kế, hiệu năng của bộ điều khiển PID thông thường so với bộ điều khiển học lặp. Các thông số của bộ điều khiển PID được lựa chọn bằng phương pháp thực nghiệm ($K_p = 9$, $K_i = 0.3$ và $K_d = 0.012$).

Trường hợp 1: Trong trường hợp này, không có tải trọng được áp dụng $F=0KN$. Quỹ đạo mong muốn được chọn là tín hiệu hình sin có biên độ 35 deg. và tần số 0,1 Hz.

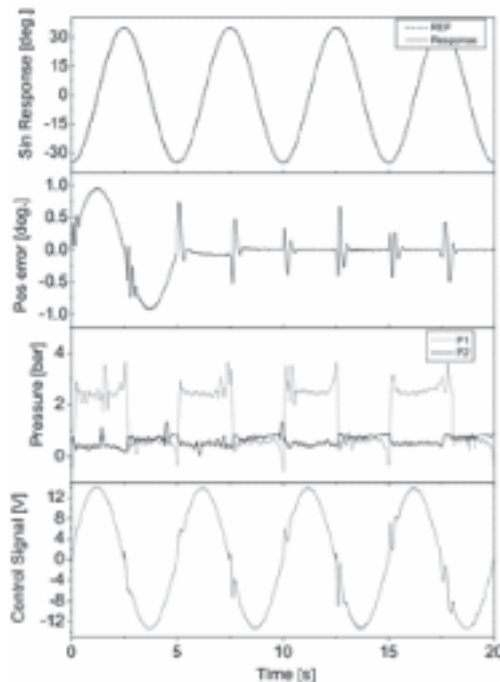
Khi áp dụng phương pháp điều khiển được đề xuất, đáp ứng của hệ thống truyền động điện thủy lực (EHRA), tín hiệu điều khiển đầu vào và các trạng thái của hệ thống được thể hiện ở Hình 3. Từ hình này có thể thấy, bộ

điều khiển PID học lặp lại cho kết quả bám quỹ đạo rất tốt. Sau hai lần học lặp, đáp ứng bám đã được điều chỉnh với sai số bám chủ yếu nằm trong khoảng 0,05 deg. Hiện tượng rung động của tín hiệu điều khiển xảy ra khi xy lanh xoay đổi hướng chuyển động. Điều này có thể được giải thích bởi sự thay đổi của các yếu tố bất định hệ thống trong quá trình đảo chiều của bơm. Tuy nhiên, tín hiệu điều khiển nhanh chóng được điều chỉnh về giá trị tối ưu một cách trơn tru.

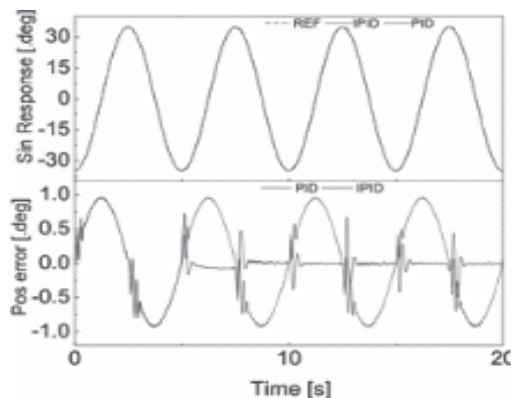
Kết quả so sánh giữa bộ điều khiển đề xuất và các kỹ thuật khác được trình bày ở Hình 4. Có thể thấy rằng bộ điều khiển PID thông thường cho đáp ứng kém hơn. Do sự xuất hiện của các yếu tố phi tuyến và bất định, bộ điều khiển PID không thể đảm bảo độ chính xác bám quỹ đạo tham chiếu hình sin. So với bộ điều khiển PID, bộ điều khiển đề xuất PID học lặp đã đạt được kết quả bám rất tốt chỉ sau hai lần cập nhật.

Trường hợp 2: Trường hợp nghiên cứu này tiến hành nhiệm vụ bám theo quỹ đạo dạng hình sin có tần số 0,2 Hz, biên độ 35 deg. trong điều kiện tải trọng 300 N. Kết quả đáp ứng của bộ truyền động điện thủy lực (EHRA), các trạng thái của hệ thống và tín hiệu điều khiển đầu vào khi áp dụng bộ điều khiển đề xuất được thể hiện trong Hình 5 và Hình 6. Kết quả từ các hình này cho thấy, ngay cả trong điều kiện làm việc khó khăn hơn, bộ điều khiển đề xuất với cơ chế học lặp lại vẫn duy trì được hiệu suất bám rất tốt. Trong khi đó, bộ điều khiển PID không thể đảm bảo độ chính xác cao khi bám theo quỹ đạo tham chiếu.





Hình 5. Phản hồi của hệ thống đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.2Hz, điều kiện tải trọng 30 kgf



Hình 6. So sánh đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.2Hz, điều kiện tải trọng 30 kgf.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất và thiết kế một hệ thống điều khiển dựa trên bộ điều khiển PID truyền thống kết hợp với cơ chế học lặp để áp dụng vào điều khiển quỹ đạo của hệ thống EHRA mới. Việc tích hợp cơ chế học lặp vào bộ điều khiển PID truyền thống cho thấy khả

năng cải thiện hiệu suất điều khiển với thuật toán đơn giản và ổn định. Cuối cùng, kết quả mô phỏng đã chứng minh rõ ràng tính khả thi của phương pháp đề xuất. Với độ chính xác cao trong việc bám quỹ đạo và khả năng triển khai dễ dàng trên hệ thống EHRA điều khiển bằng bơm, nghiên cứu này là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo của chúng tôi trong việc phát triển hệ thống định vị tuần hoàn ứng dụng trong công nghiệp.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 20/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Dao Thanh Liem, “Bộ điều khiển trượt PID thích nghi ứng dụng trong điều khiển vị trí hệ thống thủy lực”. Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải, tập 12, số 4, trang 26-33. [https://www.doi.org/10.55228/JTST.12\(4\).26-33](https://www.doi.org/10.55228/JTST.12(4).26-33)
- [2]. Brecher, C., Jasper, D., and Fey, M., “Analysis of New, Energy-Efficient Hydraulic Unit for Machine Tools”. International Journal of Precision and Manufacturing-Green technology, Vol. 4, No. 1, pp. 5-11, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27290-5_28
- [3]. Tri, N.M., Ba, D.X. & Ahn, K.K., “A Gain-Adaptive Intelligent Nonlinear Control for an Electrohydraulic Rotary Actuator”. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 19, 665-673 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0080-5>
- [4]. Truong DQ, Ahn K.K., “Force control for press machines using an online smart tuning fuzzy PID based on a robust extended Kalman filter”. Expert Systems with Applications 2011; 38(5); 5879-5894.
- [5]. S. Arimoto, et al., “Bettering operation of Robots by learning”. Journal of Robotic Systems Vol. 1(2) 123-140, 1984. <https://doi.org/10.1002/rob.4620010203>
- [6]. A. Madady, “An Extended PID Type Iterative Learning Control”. International Journal of Control, Automation, and Systems Vol. 11(3) 470-481, 2013.

THỰC NGHIỆM ĐỘ BỀN KÉO CỦA MẪU KIM LOẠI ÉP NHIỆT

EXPERIMENT ON THE TENSILE STRENGTH OF HOT-PRESSED METAL SAMPLES

Nguyễn Trương Trường Giang, Nguyễn Ngọc Phương, Trần Thanh Thuởng, Trần Thanh Lam*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21143455@student.hcmute.edu.vn; phuongnn@hcmute.edu.vn;
thuongtt@hcmute.edu.vn; *lamtt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào quá trình thực nghiệm đo độ bền kéo của các mẫu kim loại được xử lý bằng phương pháp ép nhiệt. Các mẫu được chế tạo với cấu trúc lớp khác nhau và ép ở nhiều mức nhiệt độ nhằm đánh giá ảnh hưởng của điều kiện ép đến tính cơ học của vật liệu. Kết quả thử kéo cho thấy rõ sự biến thiên về giới hạn chảy và lực kéo đứt giữa các cấu hình mẫu, trong đó một số mẫu có biểu hiện suy giảm nghiêm trọng độ bền do tách lớp hoặc giòn hóa ở nhiệt độ cao. Phân tích dữ liệu chỉ ra rằng nhiệt độ ép vượt ngưỡng 640°C có thể gây ảnh hưởng tiêu cực đến cấu trúc liên kết của vật liệu nếu không có lớp kết dính trung gian. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất sử dụng lớp kẽm (Zn) nhằm cải thiện chất lượng liên kết giữa các lớp vật liệu và ổn định đặc tính cơ học. Kết quả thu được là cơ sở cho việc tối ưu hóa quy trình chế tạo vật liệu kim loại ép nhiệt trong các ứng dụng yêu cầu độ bền cao.

Từ khóa: Ép nhiệt; Kim loại nhiều lớp; Thử kéo; Giới hạn bền; Nhiệt độ ép; Cấu trúc lớp; Vật liệu kim loại; Lớp kết dính kẽm.

ABSTRACT

This study investigates the tensile strength of metal specimens fabricated using hot pressing under varying thermal conditions. Several multilayer metal samples were prepared with different structural configurations and subjected to tensile testing to evaluate the influence of pressing temperature and internal layer arrangement on mechanical performance. The results reveal significant differences in yield strength and ultimate tensile strength among samples, with certain configurations exhibiting severe interfacial delamination or embrittlement at elevated temperatures. Analysis indicates that pressing temperatures above 640°C may degrade material integrity without a suitable bonding layer. To address this, the study proposes incorporating a zinc (Zn) interlayer to enhance metallurgical bonding and preserve the mechanical characteristics of the base metal. These findings provide valuable insights for optimizing the hot-pressing process in the development of high-strength laminated metal materials for engineering applications.

Keywords: Hot pressing; Multilayer metal; Tensile test; Yield strength; Pressing temperature; Layer structure; Zinc bonding layer; Mechanical performance. 

1. TỔNG QUAN

Vật liệu kim loại nhiều lớp chế tạo bằng phương pháp ép nhiệt đang trở thành một lĩnh vực nghiên cứu nổi bật trong khoa học vật liệu nhờ khả năng tích hợp các đặc tính cơ học ưu việt từ từng thành phần riêng lẻ, chẳng hạn như độ bền, độ cứng, và khả năng chống mài mòn [1, 2]. Phương pháp ép nhiệt, thông qua việc áp dụng nhiệt độ và áp lực trong điều kiện kiểm soát, tạo điều kiện cho quá trình khuếch tán nguyên tử hoặc phản ứng luyện kim tại bề mặt tiếp xúc giữa các lớp, từ đó hình thành liên kết bền vững giữa các vật liệu [3]. Kết quả là, các tổ hợp vật liệu nhiều lớp thường thể hiện độ bền kéo, độ cứng, và khả năng chịu tải vượt trội so với các vật liệu đơn thành phần [4, 5]. Tuy nhiên, hiệu quả của liên kết này phụ thuộc mạnh mẽ vào các thông số công nghệ như nhiệt độ, áp lực, thời gian ép, và sự hiện diện của các lớp trung gian [6].

(*) Cơ chế và thách thức của liên kết ép nhiệt

Trong quá trình ép nhiệt, liên kết giữa các lớp được hình thành nhờ sự khuếch tán nguyên tử qua bề mặt tiếp xúc, đôi khi kèm theo các phản ứng luyện kim tạo ra các pha hợp kim tại ranh giới [7]. Tuy nhiên, các nghiên cứu chỉ ra rằng nếu các thông số không được tối ưu, liên kết có thể bị suy yếu do các khuyết tật vi cấu trúc như nứt, lỗ rỗng, hoặc tách lớp [8]. Chẳng hạn, nhiệt độ ép quá cao có thể gây ra hiện tượng giòn hóa hoặc làm xuất hiện các ứng suất nhiệt dư do sự chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt giữa các vật liệu [9]. Ngược lại, nhiệt độ quá thấp có thể không đủ để kích hoạt khuếch tán, dẫn đến liên kết yếu và dễ bị phá hủy dưới tải trọng cơ học [10].

Một thách thức khác là sự tương thích

giữa các vật liệu khác nhau, đặc biệt khi kết hợp kim loại với các vật liệu composite hoặc kim loại có tính chất vật lý khác biệt [11]. Ví dụ, khi ép nhiệt nhôm và thép, sự khác biệt về độ dẫn nhiệt và hệ số giãn nở nhiệt có thể gây ra ứng suất nội tại, làm giảm độ bền kéo và giới hạn chảy của mẫu [12]. Để khắc phục, các nghiên cứu gần đây đề xuất sử dụng các lớp trung gian nhằm cải thiện liên kết và giảm thiểu các khuyết tật cấu trúc [13].

(*) Vai trò của lớp trung gian trong ép nhiệt

Lớp trung gian đóng vai trò như một “cầu nối” luyện kim, giúp tăng cường khả năng tương thích giữa các vật liệu và cải thiện tính chất cơ học của tổ hợp [14]. Trong số các vật liệu trung gian, kẽm (Zn) được đánh giá cao nhờ nhiệt độ nóng chảy thấp ($\sim 419^{\circ}\text{C}$) và khả năng tạo liên kết luyện kim với nhiều kim loại khác như nhôm, magiê, và thép [1, 3]. Các nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng lớp Zn không chỉ cải thiện độ bền liên kết mà còn ngăn ngừa hiện tượng tách lớp, đặc biệt trong các mẫu nhiều lớp chịu tải trọng kéo [2, 4].

Cơ chế hoạt động của lớp Zn dựa trên khả năng tạo ra các pha hợp kim tại ranh giới tiếp xúc, chẳng hạn như Al-Zn hoặc Mg-Zn, giúp tăng cường độ bám dính giữa các lớp [5]. Hơn nữa, Zn có khả năng giảm ứng suất nhiệt dư nhờ tính chất dẻo và độ dẫn nhiệt phù hợp [6]. Kết quả thực nghiệm cho thấy, các mẫu sử dụng lớp Zn trung gian có độ bền kéo cao hơn tới 20-30% so với các mẫu không sử dụng lớp trung gian, đồng thời giảm đáng kể nguy cơ nứt vi cấu trúc [7, 8].

Tuy nhiên, việc sử dụng lớp Zn cũng đặt ra một số thách thức. Độ dày của lớp Zn cần được kiểm soát chặt chẽ, bởi lớp quá dày có thể

dẫn đến sự hình thành các pha giòn, trong khi lớp quá mỏng không đủ để đảm bảo liên kết [9]. Ngoài ra, nhiệt độ và thời gian ép cần được tối ưu để tránh hiện tượng Zn bị bay hơi hoặc phản ứng quá mức với kim loại nền [10]. Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc sử dụng các kỹ thuật phủ Zn tiên tiến, chẳng hạn như mạ điện hoặc phủ plasma, để đảm bảo độ đồng đều và kiểm soát độ dày lớp Zn [11, 12].

(*) Tầm quan trọng của việc tối ưu hóa điều kiện ép nhiệt

Việc tối ưu hóa các thông số ép nhiệt, bao gồm nhiệt độ, áp lực, và thời gian, là yếu tố then chốt để đạt được liên kết chất lượng cao và cải thiện độ bền kéo của vật liệu nhiều lớp [13]. Các nghiên cứu cho thấy rằng nhiệt độ ép thường nằm trong khoảng 400-600°C, tùy thuộc vào loại vật liệu và lớp trung gian sử dụng [14]. Áp lực ép cần đủ lớn để đảm bảo tiếp xúc chặt chẽ giữa các lớp, nhưng không được vượt quá giới hạn gây biến dạng quá mức hoặc nứt vỡ cấu trúc [1]. Thời gian ép cũng cần được điều chỉnh để đảm bảo khuếch tán đầy đủ mà không gây ra các phản ứng phụ không mong muốn [2].

Ngoài ra, việc lựa chọn môi trường ép, chẳng hạn như ép trong chân không hoặc khí trơ, có thể giúp giảm thiểu quá trình oxy hóa và cải thiện chất lượng liên kết [3]. Các nghiên cứu gần đây cũng đề xuất sử dụng các phương pháp hỗ trợ như ép nhiệt siêu âm hoặc ép nhiệt bằng dòng điện để tăng cường hiệu quả khuếch tán và giảm thời gian xử lý [4, 5].

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá thực nghiệm độ bền kéo của các mẫu kim loại nhiều lớp chế tạo bằng phương pháp ép nhiệt, với trọng tâm là phân tích vai trò của

lớp Zn trung gian trong việc cải thiện liên kết và tính chất cơ học. Bằng cách kiểm soát các thông số ép nhiệt và độ dày lớp Zn, nghiên cứu nhằm xác định các điều kiện tối ưu để đạt được độ bền kéo cao nhất, đồng thời giảm thiểu các khuyết tật vi cấu trúc. Kết quả của nghiên cứu không chỉ đóng góp vào việc hiểu biết sâu hơn về cơ chế liên kết trong vật liệu nhiều lớp mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và chế tạo các tổ hợp vật liệu tiên tiến phục vụ các ứng dụng trong công nghiệp hàng không, ô tô, và năng lượng [6-14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Độ bền kéo của vật liệu kim loại nhiều lớp phụ thuộc vào tổ hợp các yếu tố vi cấu trúc, gồm: khả năng liên kết giữa các lớp, tính tương thích nhiệt học, và phân bố ứng suất tại các bề mặt tiếp xúc. Khi vật liệu được xử lý bằng phương pháp ép nhiệt, quá trình khuếch tán nguyên tử xảy ra tại mặt phân cách, dẫn đến sự hình thành vùng chuyển tiếp có cấu trúc luyện kim, giúp cải thiện độ bền liên kết và giới hạn chịu tải của vật liệu (Li et al., 2022).

Tuy nhiên, ở nhiệt độ ép cao (trên 640°C), đặc biệt với các hệ vật liệu không tương hợp hoàn toàn như nhôm-carbon hay nhôm-magie, hiện tượng tách lớp hoặc tạo pha giòn dễ xảy ra nếu không có lớp trung gian phù hợp. Các mô hình ứng suất nội sinh cho thấy chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt giữa các lớp vật liệu có thể dẫn đến ứng suất dư lớn tại vùng biên, là nguyên nhân chính gây nứt vỡ mô hoặc hở liên kết (Zhao et al., 2019; Kim & Lee, 2015).

Để khắc phục hiện tượng này, một số nghiên cứu đã đề xuất tích hợp lớp vật liệu trung gian có khả năng phản ứng luyện kim ở nhiệt độ thấp, chẳng hạn như kẽm (Zn), vào

giữa các lớp kim loại. Kẽm không chỉ giúp giảm nhiệt độ cần thiết để tạo liên kết mà còn hình thành lớp hợp kim chuyển tiếp với nhôm hoặc magiê, làm tăng độ bám dính và phân tán ứng suất đều hơn trong vùng tiếp giáp (Fang et al., 2024; Yang et al., 2023).

Ngoài ra, cơ học phá hủy cho thấy lớp Zn còn có vai trò như một lớp “đệm mềm”, giúp hạn chế sự truyền tải ứng suất đột ngột, qua đó kéo dài thời gian tới điểm gãy trong thử kéo. Do đó, việc sử dụng lớp kết dính Zn không chỉ cải thiện tính cơ học mà còn góp phần ổn định quá trình ép nhiệt trong thực tế sản xuất (Zhang et al., 2024; Nguyen & Ito, 2024).

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. Chuẩn bị cho thí nghiệm

Quá trình kiểm tra được thực hiện trên máy kéo vạn năng 1000KN. Các tham số cụ thể của máy như sau:

Dung tải (Capacity):

- 1000 kN (tương đương ~100 tấn).

Dải tốc độ kéo nén (Crosshead speed range):

- Thường: 0,001 – 500 mm/min;
- Độ phân giải cao, cho phép kiểm soát tốc độ rất nhỏ để thử vật liệu giòn hoặc polymer.

Hành trình di chuyển của khung kéo (Crosshead travel):

- $\approx 1000 - 1500$ mm;
- Cho phép thử mẫu dài mà không bị giới hạn

bởi hành trình.

Độ chính xác và độ phân giải cảm biến lực:

- Độ chính xác: $\pm 0,5\%$ hoặc tốt hơn;
- Độ phân giải: 0,5 – 1 N.

Độ phân giải biến dạng (Extension/Displacement resolution):

- $\approx 0,001 - 0,01$ mm.

Hệ thống điều khiển và ghi dữ liệu:

- PLC hoặc PC-based, phần mềm lập sẵn các tiêu chuẩn (ASTM, ISO, JIS...);
- Giao diện đồ họa, cho phép xuất dữ liệu dạng .csv, .xls, hình ảnh đồ thị.

Phụ kiện đi kèm:

- Bộ gá mẫu kéo/nén (vật liệu kim loại, composite, cao su...);
- Bộ gá uốn ba điểm, uốn bốn điểm;
- Buồng điều nhiệt (nhiệt độ $-20^{\circ}\text{C} \dots +200^{\circ}\text{C}$).

3.2. Chuẩn bị các mẫu vật liệu composite

Dưới đây là các mẫu và thông số chế tạo:

Bảng 1. Thông số chế tạo 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

Ghi chú về 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.

4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH (RESULTS AND DISCUSSION)

Kết quả thử nghiệm kéo cho thấy sự khác biệt đáng kể về độ bền giữa các mẫu kim loại ép nhiệt với các cấu trúc lớp khác nhau. Nghiên cứu này so sánh các mẫu nhôm nguyên khối với các mẫu composite được chế tạo bằng cách ép nhiệt các lớp nhôm và sợi carbon. Các phát hiện nhấn mạnh những thách thức trong việc đạt được liên kết lớp bền vững và đề xuất

giải pháp sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian.

(*) Kết quả độ bền kéo

Các thử nghiệm độ bền kéo được thực hiện trên tám mẫu, bao gồm hai mẫu nhôm nguyên khối (Mẫu 1 và 2) và sáu mẫu composite (Mẫu 3-8) được chế tạo bằng cách ép nhiệt các lớp nhôm và sợi carbon. Kết quả được tóm tắt như sau:

- Mẫu 1 (nhôm nguyên khối, không ép nhiệt): Đạt độ bền kéo cao nhất với giới hạn đứt (UTS) là 1464 MPa, thể hiện chất lượng vượt trội của vật liệu nền.

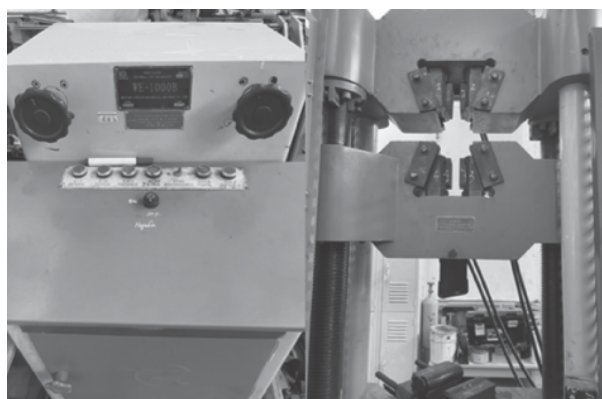
- Mẫu 2 (nhôm nguyên khối, có thể mỏng hơn): Ghi nhận UTS là 922,8 MPa, cho thấy độ dày ảnh hưởng đáng kể đến tính chất cơ học.

- Mẫu Composite (3-8): Các mẫu này, được chế tạo bằng cách ép nhiệt, có độ bền kéo thấp hơn nhiều so với các mẫu đối chứng. Cụ thể:



- ✓ Mẫu 3: 526,6 MPa;
- ✓ Mẫu 4: 279,7 MPa;
- ✓ Mẫu 5: 528,9 MPa;
- ✓ Mẫu 6: 17,1 MPa;
- ✓ Mẫu 7: 313,3 MPa;
- ✓ Mẫu 8: 1,8 MPa.

Đặc biệt, Mẫu 6 và 8 có độ bền cực thấp, gần như không chịu được lực, cho thấy sự thất bại trong liên kết giữa các lớp. Kết quả này cho thấy cấu trúc composite và điều kiện gia công ảnh hưởng mạnh mẽ đến hiệu suất cơ học của các mẫu ép nhiệt.



Hình 1. Thiết bị đo độ bền kéo của mẫu

Hình 1 minh họa thiết bị thử kéo dùng để đo độ bền kéo của các mẫu. Thiết bị bao gồm cảm biến lực, kẹp giữ mẫu và giao diện số để ghi lại dữ liệu lực và độ dịch chuyển.

(*) Các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền kéo

Sự khác biệt lớn về độ bền kéo giữa các mẫu có thể được quy cho một số yếu tố liên quan đến quá trình ép nhiệt và thành phần vật liệu:

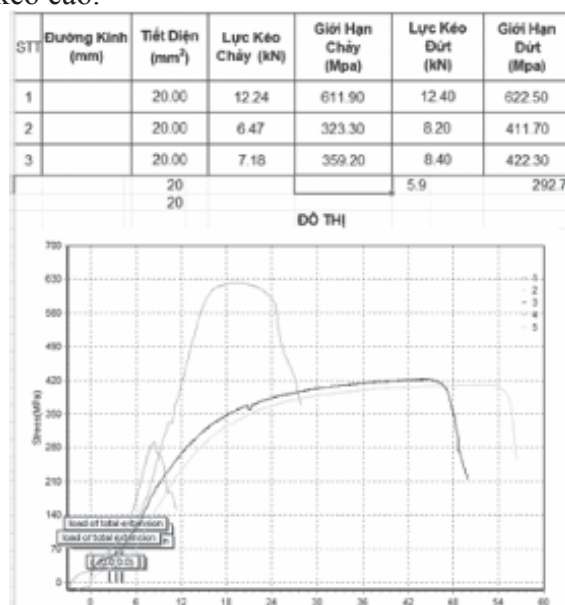
1) Thiếu liên kết giữa các lớp: Các mẫu composite (3-8) cho thấy liên kết yếu giữa lớp sợi carbon và nhôm. Sợi carbon không bám dính trực tiếp với nhôm, dẫn đến khả năng truyền tải

lực kém. Điều này đặc biệt rõ rệt ở Mẫu 6 và 8, nơi độ bền kéo gần như bằng không do liên kết lớp không hiệu quả.

2) Ảnh hưởng của nhiệt độ ép: Nhiệt độ ép cao ($>640^{\circ}\text{C}$) khiến nhôm bị mềm hóa, làm mất tính dẻo và giảm khả năng hình thành liên kết mạnh với sợi carbon. Sự suy giảm nhiệt này có thể góp phần vào độ bền thấp của các mẫu composite.

3) Cấu trúc lớp phức tạp: Các mẫu nhiều lớp, đặc biệt là Mẫu 6 và 8, dễ bị tách lớp hoặc xuất hiện vết nứt vì cấu trúc trong quá trình ép nhiệt. Sự không tương thích về hệ số giãn nở nhiệt giữa nhôm và sợi carbon, cùng với việc thiếu lớp kết dính trung gian, làm trầm trọng thêm các khuyết tật này, dẫn đến hỏng cấu trúc khi chịu tải kéo.

Những phát hiện này làm nổi bật các thách thức trong việc chế tạo composite kim loại-sợi bền vững bằng kỹ thuật ép nhiệt. Thiếu liên kết hiệu quả và độ nhạy với điều kiện gia công là những rào cản chính để đạt được độ bền kéo cao.



Hình 2. Kết quả đo độ bền kéo

Bảng 2. Kết quả kiểm tra độ bền kéo của các mẫu vật liệu

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

(*) Phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian ép

- Thiếu liên kết giữa các lớp: Sợi carbon không kết dính trực tiếp với nhôm, dẫn đến liên kết yếu tại bề mặt tiếp xúc.

- Ảnh hưởng của nhiệt độ ép: Nhiệt độ cao (>640°C) khiến nhôm mềm hóa, mất tính dẻo, làm giảm khả năng liên kết và độ bền tổng thể.

- Cấu trúc lớp phức tạp: Các mẫu nhiều lớp (như mẫu 6 và 8) dễ bị tách lớp hoặc nứt trong quá trình ép, đặc biệt khi không có lớp kết dính trung gian.

(*) Đề xuất cải tiến – Hướng sử dụng kẽm làm lớp kết dính

Để khắc phục các vấn đề trên, nhóm nghiên cứu đề xuất sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian. Với nhiệt độ nóng chảy thấp (~419°C), kẽm có thể:

- Tạo liên kết luyện kim giữa nhôm và sợi carbon ở nhiệt độ thấp hơn.
- Tránh làm hỏng cấu trúc vật liệu nền.
- Tăng cường độ bền liên kết và ổn định cơ tính của vật liệu composite.

5. KẾT LUẬN

Thực nghiệm độ bền kéo của mẫu kim loại ép nhiệt cho thấy:

- Nhiệt độ ép (>640°C) và cấu trúc nhiều lớp làm suy giảm nghiêm trọng độ bền do tách lớp hoặc giòn hóa. Mẫu nguyên khối có độ bền cao nhất (1464 MPa), trong khi mẫu composite phức tạp (mẫu 6, 8) gần như mất khả năng chịu lực.

- Sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian được đề xuất để tăng cường liên kết luyện kim ở nhiệt độ thấp, bảo toàn cơ tính vật liệu.

- Kết quả này mở ra hướng tối ưu hóa quy trình chế tạo vật liệu composite nhiều lớp, hứa hẹn ứng dụng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ bền cao như hàng không, ô tô 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: Nguyễn Trương Trường Giang, Nguyễn Ngọc Phương, Trần Thanh Thường, 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: SV2025-363.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**

Ngày phản biện: **20/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Alessi, S., Pitarresi, G., & Spadaro, G. (2014), “*Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites*”. Composites Part B: Engineering, 67, 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.06.014>
- [2]. Bhardwaj, P., & Grace, A. N. (2020), “*Antistatic and microwave shielding performance of polythiophene-graphene grafted 3-dimensional carbon fibre composite*”. Diamond and Related Materials, 106, Article 107871. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107871>
- [3]. Daniels, H. P. C. (1965), “*Ultrasonic welding*”. Ultrasonics, 3(4), 190-196. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(65\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0041-624X(65)90025-8)
- [4]. George, J. L. (2006), “*Utilization of ultrasonic consolidation in fabricating satellite decking*”. [Publisher not specified].
- [5]. Hahnlen, R., & Dapino, M. J. (2014), “*NiTi-Al interface strength in ultrasonic additive manufacturing composites*”. Composites Part B: Engineering, 59, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.021>
- [6]. Han, Y. Q., Lin, C. F., Han, X. X., Chang, Y. P., Guo, C. H., & Jiang, F. C. (2017), “*Fabrication, interfacial characterization and mechanical properties of continuous Al_2O_3 ceramic fiber reinforced Ti/Al3Ti metal-intermetallic laminated (CCFR-MIL) composite*”. Materials Science and Engineering: A, 688, 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.008>
- [7]. Hehr, A., Dapino, M. J., & Joshua, P. (2015), “*Interfacial shear strength estimates of NiTi-Al matrix composites fabricated via ultrasonic additive manufacturing*”. Composites Part B: Engineering, 77, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.025>
- [8]. Hou, M., Ye, L., & Mai, Y.-W. (1997), “*Manufacturing process and mechanical properties of thermoplastic composite components*”. Journal of Materials Processing Technology, 63(1-3), 334-338. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02665-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02665-1)
- [9]. Hwang, D., & Cho, D. (2019), “*Fiber aspect ratio effect on mechanical and thermal properties of carbon fiber/ABS composites via extrusion and long fiber thermoplastic processes*”. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 80, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.08.017>
- [10]. Kong, C. Y., & Soar, R. (2005), “*Fabrication of metal-matrix composites and adaptive composites using ultrasonic consolidation process*”. Materials Science and Engineering: A, 412(1-2), 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.213>
- [11]. Kostagiannakopoulou, C., Loutas, T. H., Sotiriadis, G., Markou, A., & Kostopoulos, V. (2015), “*On the interlaminar fracture toughness of carbon fiber composites enhanced with graphene nano-species*”. Composites Science and Technology, 118, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.09.002>
- [12]. Ma, Y., Yang, Y., Sugahara, T., & Hamada, H. (2016), “*A study on the failure behavior and mechanical properties of unidirectional fiber reinforced thermosetting and thermoplastic composites*”. Composites Part B: Engineering, 99, 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.002>
- [13]. Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017), “*Materials for wind turbine blades: An overview*”. Materials, 10(11), Article 1285. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
- [14]. Obielodan, J. O., Ceylan, A., Murr, L. E., & Stucker, B. E. (2010), “*Multi-material bonding in ultrasonic consolidation*”. Rapid Prototyping Journal, 16(3), 180-188. <https://doi.org/10.1108/13552541011036011>

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ MÔ HÌNH 3D HÀN ỐNG TỰ ĐỘNG

DESIGN OF A 3D MODEL FOR AUTOMATED PIPE WELDING

Bùi Thanh Chí Khang, Hồ Ngọc Bốn, Nguyễn Ngọc Phương, Đỗ Văn Đại*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21143355@student.hcmute.edu.vn;

bonhn@hcmute.edu.vn;

phuongnn@hcmute.edu.vn;

*daidv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu thiết kế mô hình 3D cho hệ thống hàn ống tự động sử dụng kỹ thuật hàn orbital TIG tập trung vào việc tối ưu hóa chất lượng mối hàn và hiệu suất sản xuất. Bằng cách xây dựng mô hình 3D chi tiết, tích hợp các thành phần như mỏ hàn, cơ cấu chuyển động orbital, và hệ thống điều khiển nhiệt độ, nghiên cứu nhằm mô phỏng phân bố nhiệt độ, tối ưu hóa thông số hàn, và giảm thiểu các khuyết tật mối hàn như nứt, rỗ khí, hoặc biến dạng. Quy trình thiết kế bao gồm xác định yêu cầu, mô phỏng nhiệt và cơ học, chế tạo nguyên mẫu, và thử nghiệm thực tế, sử dụng các công cụ tiên tiến như Solidworks, ANSYS, và PLC. Kết quả kỳ vọng là một hệ thống hàn orbital tự động hiệu quả, đảm bảo mối hàn đồng đều, rút ngắn thời gian sản xuất, và nâng cao hiệu quả tổng thể, phù hợp với các ứng dụng công nghiệp như dầu khí và năng lượng hạt nhân.

Từ khóa: Hàn orbital TIG; Mô hình 3D; Điều khiển nhiệt độ; Tối ưu hóa hàn; Tự động hóa.

ABSTRACT

The study focuses on designing a 3D model for an automatic pipe welding system using orbital TIG welding technology, aiming to optimize weld quality and production efficiency. The model integrates key components such as the welding torch, orbital motion mechanism, and temperature control system to simulate heat distribution, optimize welding parameters, and minimize defects like cracks, porosity, and deformation. The design process includes requirement analysis, thermal and mechanical simulation, prototype fabrication, and real-world testing, utilizing advanced tools like Solidworks, ANSYS, and PLC. The expected outcome is an efficient automatic orbital welding system that ensures uniform welds, reduces production time, and enhances overall performance, suitable for industrial applications such as oil & gas and nuclear energy.

Keywords: Orbital TIG welding; 3D modeling; Temperature control; Welding optimization; Automation. 

1. TỔNG QUAN

Hàn ống tự động sử dụng kỹ thuật hàn orbital TIG (Tungsten Inert Gas) là một phương pháp tiên tiến, đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và chất lượng cao như dầu khí, năng lượng hạt nhân, và chế tạo đường ống [1]. Kỹ thuật này cho phép tạo ra các mối hàn đồng đều, chất lượng cao trên các ống có hình dạng và kích thước đa dạng, đáp ứng các yêu cầu khắt khe về độ bền và tính toàn vẹn của sản phẩm [2]. Tuy nhiên, để đạt được chất lượng mối hàn tối ưu, việc kiểm soát nhiệt độ vùng hàn và tối ưu hóa các thông số hàn là yếu tố cốt lõi [3]. Nhiệt độ không ổn định hoặc phân bố không đều có thể dẫn đến các khuyết tật như nứt, rỗ khí, hoặc biến dạng, làm tăng chi phí sản xuất và giảm độ tin cậy của sản phẩm [4]. Nghiên cứu này tập trung vào thiết kế mô hình 3D cho hệ thống hàn orbital TIG tự động, tích hợp các thành phần như mỏ hàn, cơ cấu chuyển động orbital, và hệ thống điều khiển nhiệt độ, nhằm nâng cao hiệu suất và chất lượng mối hàn trong các ứng dụng công nghiệp hiện đại.

(*) Vai trò của hàn orbital TIG trong sản xuất công nghiệp

Hàn orbital TIG là một kỹ thuật sử dụng hồ quang điện giữa điện cực vonfram không tiêu hao và bề mặt vật liệu, được bảo vệ bởi khí trơ như argon hoặc heli [5]. Phương pháp này nổi bật với khả năng tạo ra mối hàn có độ chính xác cao, ít khuyết tật, và phù hợp với các vật liệu nhạy cảm như thép không gỉ, hợp kim niken, và titan [6]. Trong các ngành công nghiệp như dầu khí, năng lượng hạt nhân, và hàng không vũ trụ, hàn orbital TIG được ưu tiên nhờ khả năng hàn các cấu hình ống phức tạp, bao gồm các ống có đường kính nhỏ và thành mỏng [7]. Hệ thống hàn orbital tự động, với mỏ hàn xoay

quanh ống theo quỹ đạo xác định, đảm bảo tính đồng nhất của mối hàn và giảm thiểu sự phụ thuộc vào kỹ năng của thợ hàn [8]. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất của kỹ thuật này nằm ở việc kiểm soát nhiệt độ vùng hàn, đặc biệt khi hàn các cấu hình ống có hình dạng cạnh đa đường hoặc vật liệu có độ dẫn nhiệt thấp [9].

Hình 1 minh họa cấu tạo phổ biến của máy hàn orbital hồ, bao gồm mỏ hàn, cơ cấu chuyển động orbital, và hệ thống khí bảo vệ. Hình 2 thể hiện liên kết hàn ống bằng thiết bị hàn orbital, cho thấy sự đồng đều và chất lượng của mối hàn khi các thông số được tối ưu hóa.

(*) Tầm quan trọng của kiểm soát nhiệt độ trong hàn orbital TIG

Nhiệt độ vùng hàn là yếu tố quyết định chất lượng và tính toàn vẹn của mối hàn [10]. Nhiệt độ không ổn định có thể gây ra các khuyết tật như nứt do ứng suất nhiệt, rỗ khí do khí bảo vệ không hiệu quả, hoặc biến dạng do co ngót không đồng đều [11]. Để giải quyết vấn đề này, nhiều nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp kiểm soát nhiệt độ, bao gồm điều chỉnh dòng điện và điện áp hồ quang, sử dụng khí bảo vệ nóng, gia nhiệt cảm ứng điện từ, và tích hợp hệ thống làm mát chủ động [12].

Cụ thể, điều chỉnh thông số hồ quang trong hàn TIG giúp cung cấp năng lượng tập trung, cải thiện độ sâu thấu và độ bền mối hàn [13]. Sử dụng khí bảo vệ nóng (nhiệt độ 50-150°C) có thể giảm gradient nhiệt độ, nhưng cần tối ưu hóa lưu lượng và thành phần khí để đảm bảo bao phủ vùng hàn hiệu quả [14]. Gia nhiệt cảm ứng điện từ cho phép kiểm soát nhiệt nhanh chóng, nhưng gặp thách thức trong việc phân bố nhiệt độ đồng đều và thiết kế cuộn dây cảm ứng phức tạp [3]. Ngoài ra, hệ thống làm mát chủ động, chẳng hạn như làm mát

bằng nước hoặc khí nén, có thể giảm nhiệt độ dư thừa, nhưng cần được thiết kế cẩn thận để tránh làm gián đoạn quá trình hàn [4]. Nghiên cứu này đề xuất tích hợp các phương pháp trên vào một hệ thống hàn orbital tự động, sử dụng mô phỏng nhiệt và điều khiển thời gian thực để đảm bảo phân bố nhiệt độ đồng đều.

(*) Ứng dụng mô phỏng và thiết kế 3D trong tối ưu hóa hàn orbital

Để nâng cao hiệu quả của hệ thống hàn orbital TIG, các công cụ thiết kế và mô phỏng tiên tiến như Solidworks, ANSYS, và COMSOL Multiphysics được sử dụng để phân tích phân bố nhiệt độ, động lực học của vũng hàn, và ứng suất cơ học [5]. Các mô hình 3D cho phép mô phỏng chính xác các quá trình hàn, từ đó tối ưu hóa quỹ đạo hàn, thông số vận hành, và thiết kế cơ cấu chuyển động orbital [6]. Chẳng hạn, ANSYS có thể được sử dụng để phân tích trường nhiệt và ứng suất nhiệt trong vùng hàn, trong khi COMSOL Multiphysics hỗ trợ mô phỏng tương tác giữa dòng khí bảo vệ và vũng hàn [7]. Solidworks, mặt khác, được sử dụng để thiết kế các thành phần cơ khí như mỏ hàn và cơ cấu chuyển động, đảm bảo độ chính xác và khả năng tương thích của hệ thống [8].

Nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng mô hình 3D tích hợp, bao gồm mỏ hàn, cơ cấu chuyển động orbital, và hệ thống điều khiển nhiệt độ. Mô hình này không chỉ mô phỏng các quá trình nhiệt và cơ học mà còn cho phép thử nghiệm các kịch bản hàn khác nhau, từ đó xác định các thông số tối ưu [9]. Kết quả kỳ vọng là một hệ thống hàn tự động linh hoạt, có khả năng thích ứng với các yêu cầu sản xuất đa dạng, đồng thời giảm thiểu khuyết tật và nâng cao hiệu suất.

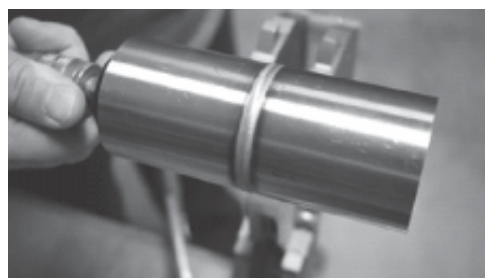
(*) Lựa chọn vật liệu và tích hợp hệ thống khí bảo vệ

Việc lựa chọn vật liệu chế tạo cho các thành phần của hệ thống hàn orbital, đặc biệt là mỏ hàn và cơ cấu chuyển động, đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ bền nhiệt và hiệu suất vận hành [10]. Các vật liệu như hợp kim vonfram, thép không gỉ, và gốm chịu nhiệt được ưu tiên nhờ khả năng chịu nhiệt độ cao và chống ăn mòn [11]. Ngoài ra, hệ thống khí bảo vệ hiệu quả, sử dụng các khí trơ như argon hoặc hỗn hợp argon-heli, giúp giảm tổn thất nhiệt và bảo vệ vùng hàn khỏi ôxy hóa [12].

Nghiên cứu này đề xuất tích hợp một hệ thống khí bảo vệ thông minh, có khả năng điều chỉnh lưu lượng và thành phần khí dựa trên điều kiện hàn thực tế [13]. Hệ thống này sẽ được kết hợp với các cảm biến nhiệt độ và mô phỏng thời gian thực để đảm bảo bao phủ vùng hàn tối ưu, từ đó giảm thiểu các khuyết tật như rỗ khí và cải thiện chất lượng mối hàn [14].



Hình 1. Cấu tạo phổ biến của máy hàn orbital hồ



Hình 2. Liên kết hàn ống bằng thiết bị hàn orbital 

2. CÁC YÊU CẦU CỦA THIẾT KẾ

Bước đầu tiên là xác định các yêu cầu cụ thể của máy hàn orbital dựa trên ứng dụng thực tế, chẳng hạn như hàn ống trong ngành dầu khí, năng lượng hạt nhân, hoặc chế tạo đường ống. Các yêu cầu bao gồm:

- Kích thước và vật liệu ống: Đường kính (10-500 mm), độ dày thành ống (1-20 mm), vật liệu (thép không gỉ, hợp kim titan, thép carbon).

- Thông số hàn TIG: Dòng điện (10-300 A, AC/DC), tốc độ hàn (0.1-10 RPM), khí bảo vệ (argon hoặc argon-heli).

- Môi trường vận hành: Nhiệt độ (-20°C đến 50°C), độ ẩm, yêu cầu chống ăn mòn.

- Tính tự động hóa: Tự động hoàn toàn hoặc bán tự động, tích hợp với PLC.

- Chất lượng mối hàn: Không khuyết tật (nứt, rỗ khí).

* Phân tích kỹ thuật:

- Phân tích đặc tính nhiệt và cơ học của vật liệu ống để xác định thông số hàn phù hợp (nhiệt độ nóng chảy, độ dẫn nhiệt).

- Xác định độ chính xác chuyển động orbital và khả năng điều chỉnh cho các kích thước ống khác nhau.

- Đánh giá yêu cầu tích hợp cảm biến (nhiệt độ, vị trí) và hệ thống điều khiển thời gian thực để đáp ứng tự động hóa.

3. THIẾT KẾ MÔ HÌNH 3D

Sử dụng phần mềm thiết kế như

Solidworks, Autodesk Inventor, hoặc CATIA để xây dựng mô hình 3D của máy hàn orbital. Các thành phần chính bao gồm:

- Mỏ hàn TIG: Đầu cực vonfram, hệ thống cấp khí bảo vệ, cơ cấu làm mát bằng nước hoặc khí.

- Cơ cấu chuyển động orbital: Hệ thống bánh răng, động cơ servo/stepper để xoay mỏ hàn quanh ống.

- Đồ gá cố định ống: Đảm bảo ống được cố định chắc chắn, không rung lắc.

- Hệ thống cấp dây hàn (nếu cần): Cơ chế cấp dây tự động với tốc độ ổn định.

- Khung máy: Đảm bảo độ bền, chống rung, và dễ dàng lắp đặt tại hiện trường.

* Các bước chi tiết:

- Thiết kế mỏ hàn: Góc nghiêng mỏ hàn (10-20°) được tối ưu để đảm bảo hồ quang ổn định và tiếp cận tốt vùng hàn. Tích hợp vòi phun khí bảo vệ với lưu lượng điều chỉnh.

- Cơ cấu chuyển động orbital: Thiết kế hệ thống dẫn động với động cơ servo và bánh răng chịu tải cao, hỗ trợ tốc độ quay từ 0.1-10 RPM.

- Đồ gá cố định: Thiết kế đồ gá điều chỉnh linh hoạt, tương thích với nhiều đường kính ống (50-300 mm) và có cơ chế khóa nhanh.

- Khung máy: Sử dụng thép không gỉ hoặc hợp kim nhôm để đảm bảo độ bền và chống ăn mòn trong môi trường công nghiệp.

*** Phân tích kỹ thuật:**

- Kiểm tra độ bền và rung động của khung máy, đảm bảo chịu được tải trọng động trong quá trình hàn.

- Tối ưu hóa thiết kế bánh răng và động cơ để giảm ma sát, tăng độ chính xác quỹ đạo.

4. MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH

*** Mô tả:**

Sử dụng ANSYS, COMSOL Multiphysics, hoặc Flow-3D để mô phỏng hiệu suất máy hàn orbital:

- Phân bố nhiệt độ: Dự đoán gradient nhiệt độ trong vùng hàn.

- Dòng chảy khí bảo vệ: Đảm bảo bao phủ vùng hàn, ngăn oxy hóa.

- Ứng suất và biến dạng: Đánh giá tác động nhiệt đến ống.

- Quỹ đạo mỏ hàn: Xác minh độ chính xác chuyển động orbital.

*** Các bước chi tiết:**

- Nhập mô hình 3D, thiết lập điều kiện biên (nhiệt độ môi trường, thông số hàn).

- Mô phỏng nhiệt để xác định điểm nóng/lạnh, tối ưu hóa vị trí cảm biến.

- Mô phỏng dòng chảy khí (lưu lượng 5-20 L/phút, áp suất 0.1-0.5 MPa).

- Phân tích ứng suất nhiệt (giới hạn ứng suất <80% giới hạn chảy).

*** Phân tích kỹ thuật:**

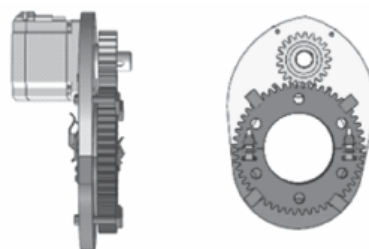
- Đảm bảo chênh lệch nhiệt độ <10°C, đáp ứng AWS D10.10.

- Tối ưu hóa quỹ đạo mỏ hàn, giảm 10-20% thời gian chu kỳ.

- Giảm 5-10% tiêu thụ điện so với hàn thủ công.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

(*) Phân tích sơ bộ



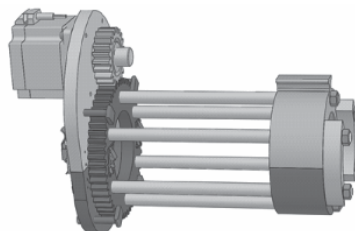
Hình 3. Thiết kế tổng quan của hệ thống

- Hệ thống truyền động từ động cơ qua bánh răng nhỏ truyền tới bánh răng lớn;

- Bánh răng lớn bị cắt đôi cùng với tấm đỡ có tác dụng kẹp ống;

- Trên tấm đỡ và bánh răng lớn có khóa tháo lắp nhanh;

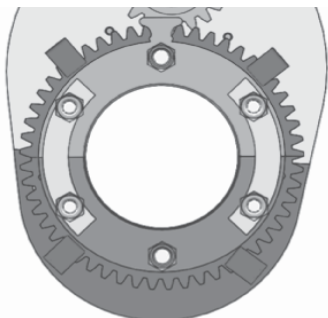
- Tấm đỡ được gắn 4 cụm giữ (hông) để giữ cho bánh răng lớn không bị rơi ra ngoài.



Hình 4. Cơ cấu giữ ống

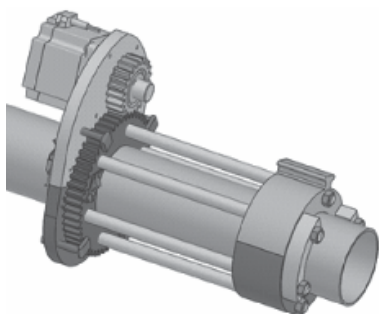


- Bánh răng lớn có 6 lỗ gắn với trục nối dài;
- 6 trục sẽ gắn với 2 bạc đỡ (xanh, nâu).



Hình 5. Cơ cấu xoay điện cực

- 2 bạc đỡ (xanh, nâu) được giữ lại bằng 2 tấm giữ (vàng);
- Được kẹp chặt bằng 6 đai ốc;
- Trên bạc đỡ (xanh) có 1 một rãnh chữ T có tác dụng kết nối với cụm chi tiết của mũi hàn TIG.



Hình 6. Thiết bị được lắp hoàn chỉnh

Dưới đây là nội dung được viết lại với độ dài khoảng 1000 từ, giữ nguyên ý chính và cấu trúc, nhưng diễn đạt theo cách mới mẻ, rõ ràng hơn, đồng thời bổ sung một số chi tiết để làm rõ nội dung:

(*) Phát triển và phân tích máy hàn Orbital hồ cho ống phi 90

Sau nhiều lần tinh chỉnh thiết kế dựa trên các yếu tố thực tế, tính khả thi trong sản

xuất, và việc tận dụng các linh kiện có sẵn như bánh răng, ống thép phi 90, nhóm nghiên cứu đã hoàn thiện một sản phẩm đột phá: máy hàn Orbital hồ. Thiết bị này được thiết kế để đáp ứng nhu cầu hàn tự động cho các đường ống trong các ngành công nghiệp như dầu khí, năng lượng, và hóa chất, với độ chính xác và hiệu quả cao.

* Thiết kế tổng quan của hệ thống

Máy hàn Orbital hồ được xây dựng dựa trên một hệ thống truyền động cơ học thông minh, kết hợp các chi tiết được chế tạo chính xác để đảm bảo quỹ đạo mỏ hàn ổn định và mối hàn đạt chất lượng cao. Cấu trúc chính của máy bao gồm:

• Hệ thống bánh răng:

- Bánh răng lớn: Được thiết kế chia đôi, kết hợp với một tấm đỡ cũng chia đôi, tạo thành một cơ cấu kẹp chặt ống thép phi 90. Bánh răng lớn được cố định bằng bốn kẹp tháo lắp nhanh, giúp dễ dàng gắn hoặc tháo khỏi ống trong quá trình vận hành.

- Bánh răng nhỏ: Gắn trên tấm đỡ và kết nối trực tiếp với động cơ, đóng vai trò truyền mô-men xoắn từ động cơ đến bánh răng lớn, tạo chuyển động quay cho toàn bộ hệ thống.

• Cơ cấu đỡ và truyền động:

- Mặt ngoài của bánh răng lớn được gắn sáu trục dài, đóng vai trò làm khung đỡ cho các chi tiết liên kết với đầu hàn TIG. Các trục này đảm bảo sự ổn định và chính xác trong chuyển động quay của mỏ hàn.

- Hai bạc đỡ (màu xanh và nâu) được gắn vào sáu trục, tạo thành một hệ thống liên

kết chắc chắn giữa bánh răng lớn và cụm đầu hàn.

- Cơ cấu xoay điện cực:

- Hai bạc đỡ được cố định bằng hai tấm giữ (màu vàng) và kẹp chặt bằng sáu đai ốc, đảm bảo độ bền cơ học trong quá trình vận hành.

- Trên bạc đỡ màu xanh, một rãnh chữ T được gia công để kết nối với cụm chi tiết của mỏ hàn TIG. Rãnh này cho phép điều chỉnh vị trí mỏ hàn một cách linh hoạt, đảm bảo quỹ đạo hàn chính xác.

- Cơ chế kẹp ống:

- Bánh răng lớn và tấm đỡ được trang bị các khóa tháo lắp nhanh, giúp việc gắn máy vào ống hoặc tháo rời diễn ra nhanh chóng, tiết kiệm thời gian.

- Bốn cụm giữ (màu hồng) được bố trí trên tấm đỡ, đảm bảo bánh răng lớn không bị xô dịch hoặc rơi ra trong quá trình hoạt động.

* Quá trình phát triển và thách thức

Việc thiết kế và chế tạo máy hàn Orbital hờ đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng nhiều yếu tố, từ độ chính xác của các chi tiết cơ khí đến khả năng tích hợp hệ thống điều khiển. Một số thách thức chính bao gồm:

- Độ chính xác trong thiết kế 3D: Mô hình 3D của máy phải đảm bảo các thành phần như mỏ hàn, cơ cấu chuyển động orbital, và hệ thống điều khiển nhiệt độ hoạt động đồng bộ. Việc mô phỏng nhiệt và cơ học để tối ưu hóa thiết kế là một quá trình phức tạp, đòi hỏi nhiều lần thử nghiệm và điều chỉnh.

- Tối ưu hóa vòi phun khí bảo vệ: Vòi phun khí bảo vệ phải được thiết kế sao cho cung cấp dòng khí đều, bảo vệ môi hàn khỏi oxy hóa, đồng thời không làm tăng trọng lượng hoặc cản trở chuyển động của mỏ hàn.

- Cân bằng nhiệt độ và hiệu suất truyền nhiệt: Trong quá trình hàn TIG, việc duy trì nhiệt độ đồng đều trong vùng hàn là yếu tố then chốt để tránh các khuyết tật như nứt hoặc rỗ khí. Nhóm nghiên cứu đã phải tích hợp các giải pháp làm mát và điều chỉnh thông số hàn để đạt được hiệu quả tối ưu.

* Ưu điểm của máy hàn Orbital hờ

Máy hàn Orbital hờ mang lại nhiều lợi ích vượt trội, đặc biệt trong các ứng dụng công nghiệp yêu cầu chất lượng môi hàn cao:

- ✓ Tối ưu cho ống phi 90 mm: Máy được thiết kế chuyên biệt cho ống thép có đường kính 90 mm, đảm bảo quỹ đạo mỏ hàn chính xác, tạo ra môi hàn đồng đều và thẩm mỹ. Thiết bị này đặc biệt phù hợp cho các dự án đường ống trong ngành dầu khí và năng lượng.

- ✓ Chất lượng môi hàn vượt trội: Nhờ sử dụng kỹ thuật hàn TIG tự động, máy giảm thiểu các khuyết tật phổ biến như nứt, rỗ khí, hoặc cháy biên. Môi hàn đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt như ASME và AWS.

- ✓ Tự động hóa hiệu quả: Hệ thống tự động hóa giúp tiết kiệm 15-20% thời gian chu kỳ hàn so với phương pháp hàn thủ công. Giao diện HMI (Human-Machine Interface) thân thiện, cho phép người vận hành dễ dàng cài đặt và giám sát quá trình hàn.

- ✓ Dễ sử dụng: Cơ chế kẹp tháo lắp nhanh và đồ gá cố định đảm bảo độ đồng tâm cao, giúp việc

lắp đặt và vận hành trở nên đơn giản, ngay cả với những người vận hành mới.

* Hạn chế của thiết bị

Mặc dù có nhiều ưu điểm, máy hàn Orbital hồ vẫn tồn tại một số hạn chế cần được khắc phục trong các phiên bản tương lai:

✓ Giới hạn về kích thước ống: Thiết bị hiện chỉ phù hợp với ống phi 90 mm. Việc mở rộng khả năng hàn cho các kích thước ống khác đòi hỏi thiết kế lại bánh răng và đồ gá, làm tăng chi phí và độ phức tạp.

✓ Thiếu tính linh hoạt: Bánh răng và đồ gá được chế tạo cố định, khó điều chỉnh để phù hợp với các loại ống không chuẩn hoặc vật liệu mới (như hợp kim đặc biệt). Điều này hạn chế phạm vi ứng dụng của máy trong các dự án đa dạng.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thiết kế mô hình 3D cho hệ thống hàn ống tự động sử dụng kỹ thuật hàn orbital TIG đã đối mặt với nhiều thách thức trong khâu thiết kế mô hình 3D, bao gồm việc đảm bảo độ chính xác của các thành phần như mỏ hàn, cơ cấu chuyển động orbital, và hệ thống điều khiển nhiệt độ. Các vấn đề phát sinh từ việc tích hợp mô phỏng nhiệt và cơ học, tối ưu hóa thiết kế vòi phun khí bảo vệ, cũng như cân bằng giữa độ đồng đều nhiệt độ và hiệu suất truyền nhiệt trong vùng hàn.

(*) 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: Bùi Thanh Chí Khang, Hồ Ngọc Bốn, Nguyễn Ngọc Phương, 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: SV2025-348. ♦

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Blunt, J., & Balchin, N. C. (2002), “*Health and safety in welding and allied processes*”. CRC Press.
- [2]. Wu, R., Huang, Y., Rong, Y., & Xu, J. (2022), “*Research on welding-induced inhomogeneous stress in thick plate EH40 butt joint considering phase transformation*”. Journal of Materials Research and Technology, 19, 1846-1861. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.166>
- [3]. Balasubramanian, V., Varahamoorthy, R., Ramachandran, C. S., & Muralidharan, C. (2009), “*Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40(9-10), 887-897. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1406-8>
- [4]. Dawes, C. T. (1992), “*Laser welding: A practical guide*”. Abington Publishing.
- [5]. Ha, Y. S. (2008), “*Development of thermal distortion analysis method on large shell structure using inherent strain as boundary condition*”. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 45(1), 93-100. <https://doi.org/10.3744/SSNAK.2008.45.1.093>
- [6]. Capraz, O., Meran, C., Warner, W., & Gungor,

- A. (2015), “*Using AHP and TOPSIS to evaluate welding processes for manufacturing plain carbon stainless steel storage tank*”. Archives of Materials Science and Engineering, 76(2), 157-162.
- [7]. Chen, Y., Yang, Y., He, X., Chi, Q., Qi, L., Li, W., & Li, X. (2023), “*Effect of Nb content and second heat cycle peak temperatures on toughness of X80 pipeline steel*”. Materials, 16(24), 7632. <https://doi.org/10.3390/ma16247632>
- [8]. Esawi, A. M. K., & Ashby, M. F. (2004), “*Computer-based selection of joining processes: Methods, software and case studies*”. Materials & Design, 25(7), 555-564. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.02.006>
- [9]. Hwang, S. Y., Kim, Y., & Lee, J. H. (2016), “*Finite element analysis of residual stress distribution in a thick plate joined using two-pole tandem electro-gas welding*”. Journal of Materials Processing Technology, 229, 349-360. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.013>
- [10]. Ainali, M., Falkenö, A., & Robinson, R. (Eds.) (2006), “*Luvata, CuproBraze brazing handbook (8th ed.)*”. Luvata.
- [11]. Dunder, M., Samardzic, I., Simunovic, G., & Konjatic, P. (2020), “*Steel weldability investigation by single and double-pass weld thermal cycle simulation*”. International Journal of Simulation Modelling, 19(2), 209-218. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM19-2-511>
- [12]. Brown, N. J., Swift, K. G., & Booker, J. D. (2002), “*Joining process selection in support of a proactive design for assembly*”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 216(10), 1311-1324. <https://doi.org/10.1243/095440502320405413>
- [13]. Alia, B. L., Alley, R. L., Leroy, D., Siewert, T. A., Liu, S., & Edwards, G. R. (1993), “*Welding, brazing, and soldering (Vol. 6)*”. American Society for Metals.
- [14]. Scharf-Wildenhain, R., Haelsig, A., Hensel, J., Wandtke, K., Schroepfer, D., & Kannengiesser, T. (2023), “*Heat control and design-related effects on the properties and welding stresses in WAAM components of high-strength structural steels*”. Welding in the World, 67(4), 955-965. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01440-8>

THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG

DESIGN THE BENDING MACHINE

Bùi Minh Luân, Nguyễn Văn Tú, Huỳnh Đỗ Song Toàn, Vũ Quang Huy*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144091@student.hcmute.edu.vn;

tunv@hcmute.edu.vn;

toanhds@hcmute.edu.vn;

*huyvq@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Máy uốn ống là một thiết bị quan trọng trong ngành cơ khí, đảm nhiệm chức năng tạo hình các ống kim loại với độ chính xác cao mà không gây biến dạng tiết diện. Với sự phát triển của công nghệ mô hình hóa 3D, việc thiết kế máy uốn ống ngày càng được tối ưu hóa thông qua các phần mềm CAD hiện đại ngay từ giai đoạn lên ý tưởng cho thiết kế. Nghiên cứu này tổng hợp và phân tích các bước thiết kế chung cho máy uốn ống bằng phần mềm CAD 3D, bao gồm các bước từ phân tích yêu cầu sử dụng, lựa chọn nguyên lý uốn, thiết kế cấu trúc cơ khí, mô hình hóa 3D, phân tích cơ động học, và kiểm tra kỹ thuật. Việc ứng dụng CAD 3D giúp nâng cao hiệu suất, giảm chi phí, rút ngắn thời gian phát triển và tăng độ chính xác sản phẩm.

Từ khóa: Thiết kế máy uốn ống; CAD 3D; Mô hình máy uốn ống 3D; Thiết kế cơ khí.

ABSTRACT

The pipe bending machine is a vital device in the mechanical engineering industry, responsible for shaping metal pipes with high precision while maintaining cross-sectional integrity. With the advancement of 3D modeling technology, the design process for pipe bending machines has been increasingly optimized through modern CAD software, starting from the conceptual design phase. This study compiles and analyzes the general design procedures of pipe bending machines using 3D CAD software, including requirement analysis, selection of bending principles, mechanical structure design, 3D modeling, kinematic analysis, and technical verification. The application of 3D CAD significantly improves efficiency, reduces costs, shortens development time, and enhances product accuracy.

Keywords: Pipe bending machine design; 3D CAD; 3D pipe bending machine model; Mechanical design.

1. TỔNG QUAN

Máy uốn ống là một thiết bị cơ khí đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp như sản xuất ô tô, xây dựng, chế tạo nội thất và hệ thống nhiệt. Với yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác và tính linh hoạt, các máy uốn ống hiện đại phải có khả năng gia công những hình dạng phức tạp và bán kính cong nhỏ, đáp ứng nhu cầu đa dạng của thị trường. Quá trình thiết kế và chế tạo máy uốn ống không chỉ đòi hỏi sự hiểu biết sâu rộng về cơ khí và vật liệu mà còn cần sự hỗ trợ của các công nghệ tiên tiến để đảm bảo hiệu quả và chất lượng sản phẩm. Bài viết này trình bày tổng quan về vai trò, vật liệu, công nghệ hỗ trợ và những thách thức trong thiết kế máy uốn ống, đồng thời đề cập đến các xu hướng phát triển trong tương lai [1].

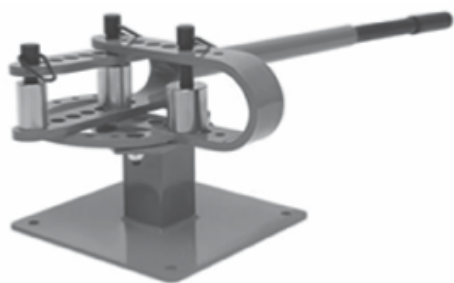
Máy uốn ống được thiết kế để tạo hình các ống kim loại mà không gây ảnh hưởng đến cấu trúc vật liệu, đảm bảo sản phẩm đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật nghiêm ngặt như ASME hoặc ISO. Trong ngành ô tô, máy uốn ống được sử dụng để sản xuất các bộ phận như ống xả, khung ghế hoặc hệ thống làm mát. Trong lĩnh vực xây dựng, thiết bị này hỗ trợ chế tạo các cấu trúc thép và hệ thống đường ống dẫn nước hoặc khí. Ngành nội thất tận dụng máy uốn ống để tạo ra các khung ghế hoặc chi tiết trang trí có hình dạng cong tinh tế, trong khi các hệ thống nhiệt và điều hòa không khí yêu cầu các ống dẫn khí và ống trao đổi nhiệt với độ chính xác cao. Sự đa dạng trong ứng dụng đòi hỏi máy uốn ống phải có khả năng xử lý nhiều loại vật liệu, từ thép carbon thông thường đến các hợp kim tiên tiến như titan hoặc inconel, đồng thời đáp ứng các kích thước và hình dạng ống khác nhau [2-5].

Vật liệu được sử dụng trong quá trình uốn ống thường bao gồm thép carbon, thép

không gỉ, nhôm, đồng và các hợp kim có độ bền cao. Mỗi loại vật liệu có đặc tính cơ học riêng, đòi hỏi các thông số uốn được điều chỉnh cẩn thận. Chẳng hạn, thép không gỉ có độ bền cao nhưng dễ bị biến dạng nếu lực uốn không đồng đều, trong khi nhôm yêu cầu lực uốn thấp hơn nhưng dễ nứt nếu bán kính cong quá nhỏ. Để đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật, máy uốn ống cần đạt độ chính xác cao với sai số chỉ từ ± 0.1 mm đến ± 0.5 mm, tùy thuộc vào ứng dụng. Ngoài ra, thiết bị phải đủ linh hoạt để gia công các ống có đường kính từ vài milimet đến hàng chục centimet, đồng thời tối ưu hóa hiệu suất bằng cách tăng tốc độ uốn và giảm thời gian chết trong sản xuất. Kết cấu máy cũng cần đảm bảo độ bền để chịu được tải trọng lớn và duy trì an toàn cho người vận hành trong quá trình sử dụng [6-9].

Sự phát triển của công nghệ thiết kế hỗ trợ máy tính (CAD) và mô phỏng kỹ thuật (CAE) đã mang lại những thay đổi lớn trong thiết kế máy uốn ống. Các phần mềm như Autodesk Inventor, Solidworks, CATIA và Creo cho phép kỹ sư mô phỏng chi tiết các cơ cấu truyền động, phân tích ứng suất và đánh giá hiệu suất của máy trước khi chế tạo. Những công cụ này giúp đảm bảo tính đồng bộ trong chuyển động của các bộ phận như khuôn uốn, trục truyền động hoặc hệ thống thủy lực, đồng thời phát hiện sớm các vấn đề như ứng suất tập trung hoặc ma sát quá mức. Nhờ các thuật toán tối ưu hóa tích hợp, kỹ sư có thể giảm trọng lượng máy, tiết kiệm vật liệu và tăng hiệu suất vận hành. Hơn nữa, việc tích hợp hệ thống điều khiển số (CNC) và tự động hóa vào máy uốn ống hiện đại cho phép lập trình chính xác các thông số uốn, giảm thiểu sai sót do con người và nâng cao hiệu quả trong sản xuất hàng loạt [10-12].





Hình 1. Máy uốn tay quay



Hình 2. Máy uốn con lăn

Dù có nhiều tiến bộ, thiết kế máy uốn ống vẫn đối mặt với những thách thức đáng kể. Việc gia công các hình dạng phức tạp với nhiều góc cong liên tiếp hoặc bán kính thay đổi đòi hỏi hệ thống khuôn và cơ cấu truyền động phải có độ linh hoạt cao. Quá trình uốn cũng có thể gây ra các vấn đề như nứt, gãy hoặc giảm độ dày thành ống, đặc biệt với các vật liệu có độ dẻo thấp. Ngoài ra, việc sử dụng công nghệ tiên tiến và vật liệu cao cấp làm tăng chi phí chế tạo, trong khi thị trường yêu cầu các giải pháp kinh tế hơn. Tích hợp các hệ thống điều khiển tự động và cảm biến thông minh cũng đặt ra thách thức trong việc phối hợp giữa cơ khí, điện tử và phần mềm. Để vượt qua những khó khăn này, các nhà thiết kế đang áp dụng các phương pháp đa ngành, kết hợp với các kỹ thuật chế tạo tiên

tiên như in 3D để tạo mẫu nhanh hoặc gia công CNC để sản xuất các chi tiết phức tạp [13].

Trong bối cảnh cách mạng công nghiệp 4.0, máy uốn ống đang được phát triển theo hướng thông minh hóa và tích hợp với các hệ thống sản xuất linh hoạt. Các công nghệ như trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet vạn vật (IoT) được ứng dụng để giám sát thời gian thực, dự đoán bảo trì và tối ưu hóa quy trình sản xuất. Việc sử dụng vật liệu composite và hợp kim tiên tiến cũng mở ra cơ hội thiết kế các máy uốn ống nhẹ hơn, hiệu suất cao hơn và có khả năng xử lý các vật liệu mới. Xu hướng tự động hóa linh hoạt tiếp tục định hình tương lai của ngành, giúp máy uốn ống đáp ứng tốt hơn nhu cầu của các ngành công nghiệp hiện đại [14].

Thiết kế máy uốn ống là một lĩnh vực kỹ thuật phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp giữa kiến thức cơ khí, vật liệu và công nghệ tiên tiến. Với vai trò quan trọng trong nhiều ngành công nghiệp, máy uốn ống cần đáp ứng các yêu cầu khắt khe về độ chính xác, hiệu suất và khả năng thích nghi với những thay đổi của thị trường. Dù đối mặt với các thách thức về gia công hình dạng phức tạp, kiểm soát biến dạng vật liệu và tối ưu hóa chi phí, các công nghệ như CAD/CAE, CNC và tự động hóa đã góp phần nâng cao hiệu quả thiết kế và sản xuất. Trong tương lai, sự tích hợp của AI, IoT và vật liệu mới sẽ tiếp tục thúc đẩy sự phát triển của máy uốn ống, mang lại những giải pháp hiệu quả và bền vững hơn cho các ngành công nghiệp.

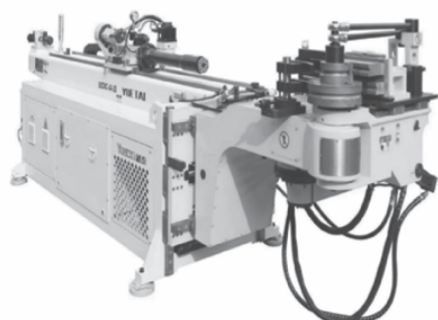
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Thiết kế máy uốn ống dựa trên nguyên lý biến dạng dẻo, trong đó mô men uốn vượt qua giới hạn đàn hồi của vật liệu, cho phép ống thay đổi hình dạng mà không gây biến dạng tiết diện. Các yếu tố lý thuyết quan trọng bao gồm

lý thuyết uốn dẻo, mô tả quá trình chuyển từ đàn hồi sang dẻo dưới tác dụng của mô men uốn; bán kính uốn tối thiểu, xác định giới hạn uốn mà không gây hư hỏng hoặc xẹp ống; biến dạng thành ống, khi thành ống giãn nở phía ngoài và nén phía trong cần được kiểm soát để tránh phá vỡ tiết diện; và tỷ số D/t , quyết định khả năng uốn và nguy cơ biến dạng ống. Bên cạnh đó, các yếu tố như ma sát, lực uốn và cơ cấu truyền động cũng ảnh hưởng đến hiệu quả và độ chính xác của máy trong quá trình uốn.

3. CÁC LOẠI MÁY UỐN ỐNG

Việc lựa chọn loại máy uốn ống phù hợp là yếu tố quan trọng trong thiết kế, phụ thuộc vào kiểu uốn, vật liệu, độ chính xác và mục đích sử dụng. Các loại máy uốn phổ biến: Máy uốn tay quay là loại đơn giản, dễ sử dụng, chi phí thấp, phù hợp với công việc nhỏ, không yêu cầu độ chính xác cao. Máy uốn con lăn sử dụng hệ thống con lăn đồng bộ để giảm ma sát, thích hợp với ống bán kính lớn và vật liệu đa dạng, tuy nhiên cần điều chỉnh cẩn thận để đảm bảo độ chính xác. Máy uốn thủy lực tạo ra lực uốn mạnh, chính xác và có khả năng uốn các hình dạng phức tạp, nhưng giá thành cao và yêu cầu bảo trì thường xuyên. Máy uốn CNC là loại hiện đại nhất, sử dụng điều khiển số để uốn ống với nhiều góc và bán kính khác nhau mà không cần thay khuôn, rất phù hợp với các ngành công nghiệp yêu cầu độ chính xác và năng suất cao.



Hình 3. Máy uốn thủy lực CNC

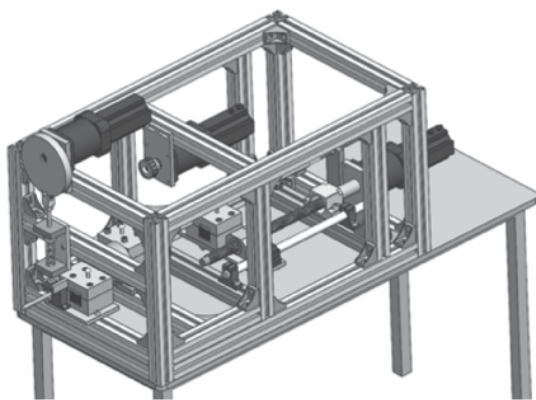
4. QUÁ TRÌNH THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG BẰNG CAD 3D

Thiết kế máy uốn ống là một quá trình kỹ thuật phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp giữa cơ học, nguyên lý truyền động và công nghệ mô phỏng tiên tiến. Quá trình này không chỉ tập trung vào việc tạo ra một thiết bị hoạt động ổn định mà còn phải đảm bảo độ chính xác cao, hiệu quả sản xuất và khả năng thích nghi với các yêu cầu đa dạng từ thực tế. Việc ứng dụng phần mềm thiết kế hỗ trợ máy tính (CAD) 3D đã trở thành công cụ không thể thiếu, cho phép mô hình hóa, kiểm tra và tối ưu hóa thiết kế trước khi tiến hành chế tạo. Nhờ đó, các sai sót tiềm ẩn được giảm thiểu, thời gian phát triển được rút ngắn và hiệu quả sản xuất được nâng cao đáng kể.

Giai đoạn đầu tiên trong thiết kế máy uốn ống là khảo sát và phân tích yêu cầu kỹ thuật. Các yếu tố cần xem xét bao gồm loại ống, chẳng hạn như ống tròn, vuông hay phi tròn, vì hình dạng ảnh hưởng trực tiếp đến phương pháp uốn và thiết kế khuôn. Đường kính ống quyết định lực uốn cần thiết và kích thước của hệ thống truyền động. Bán kính uốn là một yếu tố quan trọng, bởi bán kính càng nhỏ thì lực uốn càng lớn và yêu cầu kiểm soát biến dạng càng khắt khe. Góc uốn xác định cách bố trí các bộ phận truyền lực và chuyển động của máy. Ngoài ra, vật liệu ống, như thép, nhôm hay đồng, tác động đến độ cứng, khả năng biến dạng và lực cần thiết trong quá trình uốn. Những thông tin này là nền tảng để lựa chọn nguyên lý uốn, hệ truyền động và các tiêu chí đánh giá hiệu quả của máy.

Việc lựa chọn nguyên lý hoạt động của máy uốn ống phụ thuộc vào yêu cầu sản phẩm và công suất mong muốn. Truyền động bàn xoay là một giải pháp đơn giản, phù hợp

cho các ống lớn và ứng dụng không đòi hỏi độ chính xác cao. Trong khi đó, truyền động con lăn mang lại sự linh hoạt và độ chính xác, cho phép dễ dàng điều chỉnh bán kính uốn. Đối với các vật liệu cứng hoặc hình dạng phức tạp, hệ thống thủy lực được ưu tiên nhờ khả năng tạo lực lớn và vận hành hiệu quả. Với sản xuất hàng loạt, công nghệ điều khiển số (CNC) là lựa chọn tối ưu, cung cấp khả năng lập trình đa dạng và độ chính xác cao. Việc chọn nguyên lý phù hợp không chỉ ảnh hưởng đến cấu trúc cơ khí mà còn tác động đến khả năng điều chỉnh và chi phí chế tạo của máy.

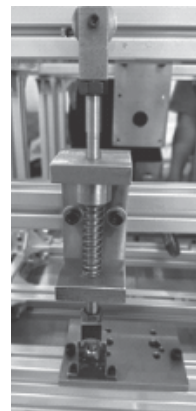


Hình 4. Mô hình hóa 3D trên phần mềm Solidworks

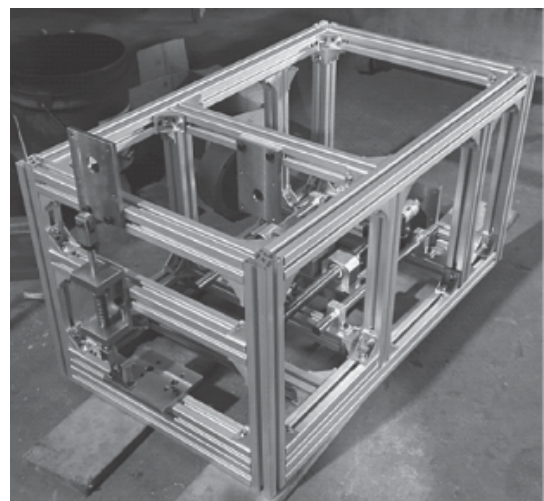
Cấu trúc cơ khí của máy uốn ống được thiết kế để đảm bảo vận hành ổn định, chính xác và bền bỉ. Khung máy đóng vai trò chịu toàn bộ lực tác động, cần được chế tạo từ vật liệu có độ cứng cao để chống biến dạng. Các trục quay và bộ phận dẫn hướng được bố trí để điều khiển chuyển động trơn tru, trong khi con lăn uốn cần được thiết kế tối ưu để giảm ma sát, tăng độ bền và linh hoạt theo các bán kính uốn khác nhau. Mỗi chi tiết phải được tính toán cẩn thận để đảm bảo sự tương thích và hoạt động đồng bộ, từ đó duy trì hiệu suất của máy trong điều kiện vận hành thực tế.

Công nghệ CAD 3D, với các phần mềm

như Autodesk Inventor, Solidworks, CATIA hay Creo, đóng vai trò quan trọng trong quá trình thiết kế. Các phần mềm này cho phép dựng mô hình 3D chính xác về kích thước, vị trí lắp ghép và chuyển động của các bộ phận. Thông qua mô phỏng chuyển động, kỹ sư có thể kiểm tra nguy cơ va chạm, đánh giá hành trình của các bộ phận và đảm bảo sự phối hợp nhịp nhàng. Phân tích lực cũng được thực hiện để xác định các vị trí chịu tải lớn, từ đó điều chỉnh kết cấu cho phù hợp. Nhờ các công cụ này, việc thử nghiệm thực tế được giảm thiểu, giúp tiết kiệm đáng kể thời gian và chi phí chế tạo.



Hình 5. Cơ cấu chân sau khi được gia công và lắp vào thân máy



Hình 6. Máy sau khi được lắp ráp hoàn chỉnh

Sau khi hoàn thiện mô hình 3D, phân tích cơ động học và ứng suất được tiến hành bằng các công cụ phân tích kỹ thuật (CAE) và phân tích phần tử hữu hạn (FEA). Phân tích chuyển động giúp đánh giá tính ổn định và tránh xung đột cơ khí giữa các bộ phận. Mô phỏng lực, ứng suất và biến dạng cho phép xác định các vùng yếu hoặc điểm có nguy cơ nứt gãy, từ đó gia cường hoặc thay đổi vật liệu để tăng độ bền. Những bước này đảm bảo máy hoạt động ổn định và có tuổi thọ cao trong điều kiện thực tế.

Cuối cùng, bản thiết kế được chế tạo thử nghiệm và kiểm tra kỹ thuật. Các bài kiểm tra bao gồm đo độ chính xác của bán kính và góc uốn, đánh giá biến dạng tiết diện sau uốn, đồng thời thử nghiệm lặp lại nhiều lần để kiểm tra độ ổn định và khả năng vận hành lâu dài. Kết quả từ các bài kiểm tra thực tế là cơ sở để điều chỉnh thiết kế, hoàn thiện sản phẩm và chuẩn bị cho quá trình sản xuất hàng loạt. Quá trình này đảm bảo máy uốn ống không chỉ đáp ứng yêu cầu kỹ thuật mà còn đạt hiệu suất tối ưu trong thực tế.

5. ƯU ĐIỂM KHI ỨNG DỤNG CAD 3D TRONG THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG

Việc ứng dụng phần mềm CAD 3D trong thiết kế máy uốn ống mang lại nhiều ưu điểm nổi bật. CAD 3D giúp tăng độ chính xác trong mô hình hóa chi tiết, đảm bảo các bộ phận cơ khí như trục, con lăn hay bộ truyền động khớp nhau hoàn hảo, tránh lỗi lắp ráp. Khả năng hiệu chỉnh nhanh và tự động cập nhật bản vẽ giúp tiết kiệm thời gian và giảm sai sót. Ngoài ra, CAD 3D còn cho phép mô phỏng hoạt động thực tế của máy, từ đó phát hiện sớm các lỗi thiết kế, giảm chi phí thử nghiệm. Mô hình 3D cũng dễ dàng chia sẻ giữa các bộ phận kỹ thuật, thúc đẩy sự phối hợp hiệu quả. Cuối cùng, dữ liệu từ CAD 3D có thể

được sử dụng trực tiếp cho gia công CNC hoặc in 3D, rút ngắn thời gian sản xuất.

6. MỘT SỐ LƯU Ý KỸ THUẬT KHI THIẾT KẾ MÁY UỐN ỐNG

Khi thiết kế máy uốn ống, cần xem xét kỹ các yếu tố kỹ thuật nhằm đảm bảo độ bền, hiệu suất và an toàn vận hành. Trước hết, vật liệu chế tạo các bộ phận như trục quay, con lăn và khung máy nên là thép hợp kim tôi cứng để chịu lực và chống mài mòn tốt. Các chi tiết chịu ma sát lớn cần được xử lý bề mặt như mạ crom hoặc thấm nitơ để tăng tuổi thọ. Hệ thống truyền động phải được tính toán chính xác về mô-men xoắn và lực uốn, đồng thời chọn đúng loại động cơ (điện, thủy lực, khí nén) để đảm bảo máy hoạt động ổn định. Cơ cấu truyền động như bánh răng, đai hoặc xích cần lắp đặt hợp lý, có che chắn bảo vệ. Đối với máy bán tự động hoặc CNC, nên tích hợp cảm biến vị trí, lực và góc quay để kiểm soát quá trình uốn, nâng cao độ chính xác và đảm bảo an toàn cho người vận hành.

7. KẾT LUẬN

Thiết kế máy uốn ống là một quá trình phức tạp đòi hỏi sự kết hợp giữa kiến thức cơ khí, vật liệu, tự động hóa và công nghệ mô phỏng. Việc ứng dụng phần mềm CAD 3D không chỉ giúp nâng cao độ chính xác mà còn tạo điều kiện để cải tiến liên tục, tiết kiệm chi phí và thời gian phát triển. Với sự phát triển không ngừng của công nghệ, máy uốn ống ngày càng được cải tiến để đáp ứng yêu cầu cao về độ chính xác, tốc độ và khả năng tùy biến trong sản xuất công nghiệp hiện đại.

(*) 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: Bùi Minh Luân, Nguyễn Văn Tú, Huỳnh Đỗ Song Toàn, 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: SV2025-360.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Abd El-Aty, A., Guo, X. Z., Lee, M. G., Tao, J., Hou, Y., & Hu, S. (2023), “A review on flexibility of free bending forming technology for manufacturing thin-walled complex-shaped metallic tubes”. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 6(2), 165-188. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.11.001>
- [2]. Yang, H. (2014), “Local loading control of uneven deformation and precise plastic forming – Principle and technology”. Science Press.
- [3]. He, S., Zeng, W., Xu, J., Yu, H., & Li, S. (2022), “The texture evolution related to the interactions between α and β phases in dual-phase region annealing of a near α titanium alloy pipe after Pilger cold rolling”. *Journal of Alloys and Compounds*, 890, 161807. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161807>
- [4]. Lee, H. W., Bae, J. H., Kim, M. S., & Kang, S. H. (2011), “Optimum design of pipe bending based on high-frequency induction heating using dynamic reverse moment”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), 1051-1058. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0140-7>
- [5]. Allwood, J. M., Duncan, S. R., Cao, J., Groche, P., Hirt, G., Kinsey, B., Kuboki, T., Liewald, M., Sterzing, A., & Tekkaya, A. E. (2016), “Closed-loop control of product properties in metal forming”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(2), 573-596. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.002>
- [6]. Heller, B., & Kleiner, M. (2006), “Semi-analytical process modelling and simulation of air bending”. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 41(1), 57-80. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA124>
- [7]. Zhao, B., Yang, Y. L., Zhao, H. Z., & Wu, J. P. (2009), “Research on thermal pushing bending process of high strength titanium alloy annular pipe”. *Journal of Materials Engineering*, (S1), 167-171.
- [8]. Osadchii, V. Y., Gaas, E. A., Zvonarev, D. Y., & Kolikov, A. P. (2014), “Shaping of thick sheet in the production of welded large-diameter pipe”. *Steel in Translation*, 44(5), 63-66. <https://doi.org/10.3103/S0967091214050098>
- [9]. Wang, G., Zhang, K. F., Wu, D. Z., Wang, J. Z., & Yu, Y. D. (2006), “Superplastic forming of bellows expansion joints made of titanium alloys”. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3), 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.10.012>
- [10]. Zhan, M., Wang, Y., Yang, H., & Huang, T. (2016), “An analytic model for pipe bending spring back considering different parameter variations of Ti-alloy pipes”. *Journal of Materials Processing Technology*, 236, 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.008>
- [11]. Genser, B., & Kleinjans, B. (2008), “L-SAW large-diameter pipe production. Top quality is what counts – Where are the trends leading? What are the benefits of UOE and JCOE?”. In *Baosteel BAC 2008* (pp. E89-E93). Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House.
- [12]. Liu, C. M., Abd El-Aty, A., Lee, M. G., Wang, S. Q., & Shi, T. (2023), “Predicting the forming limits in the tube hydroforming process by coupling the cyclic plasticity model with ductile fracture criteria”. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.103>
- [13]. Thome, M., & Vochsen, J. (2011), “High-speed calculation tool for design of the JCO® pipe forming process”. *Steel Research International*, Special Edition, 331-336.
- [14]. Abd El-Aty, A., Zhang, S. H., Xu, Y., Hou, Y., & Ha, S. (2019), “Deformation behavior and anisotropic response of 2060 Al-Cu-Li alloy: Experimental investigation and computational homogenization-based crystal plasticity modeling”. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1235-1249. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.08.006>

THIẾT KẾ CƠ CẤU XOAY ỐNG CHO QUÁ TRÌNH TẠO ỐNG

DESIGN OF A TUBE ROTATION MECHANISM FOR THE TUBE FORMING PROCESS

Hoàng Trung Kiên, Dương Đăng Danh, Đỗ Văn Hiến, Đỗ Văn Đại*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144085@student.hcmute.edu.vn;

danhdd@hcmute.edu.vn;

hiendv@hcmute.edu.vn;

*daidv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Quá trình tạo ống giữ vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp như cơ khí, đóng tàu, dầu khí và sản xuất ô tô. Một trong những thành phần then chốt trong quy trình này là cơ cấu xoay ống, có chức năng đảm bảo độ chính xác về hình học, chất lượng bề mặt sản phẩm và nâng cao hiệu quả sản xuất. Bài nghiên cứu tập trung vào việc thiết kế cơ cấu xoay ống sao cho phù hợp với các yêu cầu kỹ thuật cụ thể của quá trình tạo ống. Mục tiêu là phát triển một cơ cấu có khả năng truyền động tối ưu, đảm bảo độ ổn định cao trong vận hành và dễ dàng điều chỉnh khi cần thay đổi thông số trong sản xuất. Việc tối ưu hóa thiết kế không chỉ giúp cải thiện chất lượng sản phẩm đầu ra mà còn góp phần giảm chi phí và thời gian gia công. Kết quả nghiên cứu có thể làm cơ sở cho việc ứng dụng vào các dây chuyền sản xuất ống hiện đại, đáp ứng yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác và hiệu quả trong ngành công nghiệp chế tạo.

Từ khóa: Tạo ống; Thiết kế cơ cấu xoay; Quá trình tạo ống công nghiệp.

ABSTRACT

The tube forming process plays a crucial role in various industrial sectors such as mechanical engineering, shipbuilding, oil and gas, and automotive manufacturing. One of the key components in this process is the tube rotation mechanism, which ensures geometric accuracy, surface quality, and production efficiency. This study focuses on designing a tube rotation mechanism that meets the specific technical requirements of the tube forming process. The goal is to develop a mechanism with optimized power transmission, high operational stability, and flexible adjustability to accommodate changes in production parameters. Optimizing the design not only improves the quality of the final product but also contributes to reducing manufacturing costs and processing time. The research findings can serve as a foundation for implementing advanced tube production lines that meet the growing demands for precision and efficiency in the manufacturing industry.

Keywords: Tube forming; Rotation mechanism design; Industrial tube forming process. 

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh công nghiệp hiện đại, ngành gia công kim loại tấm và chế tạo ống đang chứng kiến sự chuyển đổi mạnh mẽ nhằm đáp ứng các yêu cầu ngày càng cao về năng suất, độ chính xác và tính linh hoạt trong sản xuất. Quá trình tạo ống, một trong những công đoạn cốt lõi của ngành, đòi hỏi sự phối hợp phức tạp giữa các hoạt động như uốn, hàn, kéo giãn và xoay ống. Trong đó, cơ cấu xoay ống đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát vị trí, tốc độ quay và mô-men, từ đó đảm bảo sự đồng đều về hình dạng, chất lượng đường hàn và bề mặt sản phẩm [1]. Tuy nhiên, các hệ thống tạo ống truyền thống thường sử dụng các cơ cấu cơ khí đơn giản, thiếu linh hoạt và khó điều chỉnh khi thay đổi kích thước ống hoặc điều kiện sản xuất [2]. Do đó, việc nghiên cứu và thiết kế một cơ cấu xoay ống hiện đại, tích hợp khả năng tự động hóa và tương thích với nhiều loại vật liệu, đang trở thành một yêu cầu cấp thiết trong các dây chuyền sản xuất [3].

(*) Vai trò của cơ cấu xoay ống trong quá trình tạo ống

Quá trình tạo ống thường bao gồm các bước như cắt, uốn, định hình và hàn, trong đó việc xoay ống là yếu tố then chốt để đảm bảo tính liên tục và độ chính xác của sản phẩm. Cơ cấu xoay ống chịu trách nhiệm truyền chuyển động quay đến phôi ống, giúp định vị chính xác vị trí hàn, duy trì sự đồng đều của lực kéo giãn và đảm bảo chất lượng bề mặt [4]. Theo nghiên cứu, tốc độ quay và mô-men xoắn của cơ cấu xoay ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định của quá trình hàn và độ bền cơ học của ống [5]. Ví dụ, trong quá trình hàn ống thép không gỉ, việc kiểm soát tốc độ xoay không đồng đều có thể dẫn đến các khuyết tật như nứt hoặc biến dạng nhiệt [6].

Hiện nay, các cơ cấu xoay ống được sử dụng phổ biến bao gồm hệ thống truyền động bằng bánh răng, dây đai hoặc động cơ servo. Tuy nhiên, những hệ thống này thường gặp phải các hạn chế như độ chính xác thấp, hao mòn cơ học cao và khó tích hợp với các hệ thống tự động hóa hiện đại [7]. Để giải quyết vấn đề này, các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc phát triển các cơ cấu xoay sử dụng động cơ bước hoặc động cơ servo kết hợp với bộ điều khiển số (CNC), cho phép điều chỉnh linh hoạt tốc độ và mô-men xoắn theo thời gian thực [8].

(*) Thách thức trong thiết kế cơ cấu xoay ống

Thiết kế cơ cấu xoay ống đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật, bao gồm:

- **Tính tương thích với nhiều kích thước và vật liệu:** Các dây chuyền sản xuất hiện đại thường yêu cầu cơ cấu xoay có khả năng xử lý các loại ống có đường kính, độ dày và vật liệu khác nhau, từ thép carbon đến hợp kim nhôm hoặc thép không gỉ [9]. Điều này đòi hỏi cơ cấu phải có khả năng điều chỉnh linh hoạt và duy trì độ chính xác cao trong các điều kiện làm việc đa dạng.

- **Kiểm soát tốc độ và mô-men xoắn:** Để đảm bảo chất lượng sản phẩm, cơ cấu xoay cần duy trì tốc độ quay ổn định và cung cấp mô-men xoắn phù hợp với từng giai đoạn của quá trình tạo ống. Các hệ thống truyền thống thường không đáp ứng được yêu cầu này, đặc biệt khi xử lý các ống có kích thước lớn hoặc vật liệu có độ cứng cao [10].

- **Tích hợp tự động hóa:** Trong bối cảnh công nghiệp 4.0, việc tích hợp cơ cấu xoay ống với các hệ thống điều khiển tự động, cảm biến và phần mềm quản lý sản xuất là một yêu cầu tất yếu. Tuy nhiên, việc này đòi hỏi thiết kế

các giao diện điều khiển phức tạp và khả năng tương thích với các giao thức công nghiệp như Modbus hoặc OPC-UA [11].

- Độ bền và bảo trì: Các cơ cấu xoay ống hoạt động trong môi trường khắc nghiệt, chịu tác động của lực ma sát, nhiệt độ cao và rung động. Do đó, việc lựa chọn vật liệu và thiết kế cấu trúc chịu lực là yếu tố quan trọng để đảm bảo độ bền và giảm thiểu chi phí bảo trì [12].

(*) Xu hướng phát triển cơ cấu xoay ống

Để đáp ứng các yêu cầu ngày càng khắt khe của ngành công nghiệp, các nghiên cứu gần đây đã đề xuất nhiều hướng tiếp cận mới trong thiết kế cơ cấu xoay ống:

- Ứng dụng công nghệ điều khiển số: Các hệ thống điều khiển số (CNC) và điều khiển logic khả trình (PLC) đã được áp dụng để cải thiện độ chính xác và tính linh hoạt của cơ cấu xoay. Các hệ thống này cho phép điều chỉnh tốc độ quay và mô-men xoắn theo thời gian thực, dựa trên phản hồi từ cảm biến lực và vị trí [13].

- Sử dụng động cơ tiên tiến: Động cơ servo và động cơ bước đang dần thay thế các hệ thống truyền động cơ khí truyền thống nhờ khả năng cung cấp mô-men xoắn cao, hoạt động ổn định và dễ dàng tích hợp với các hệ thống điều khiển [8]. Ngoài ra, các động cơ không chổi than (BLDC) cũng được nghiên cứu để giảm hao mòn và tăng tuổi thọ của cơ cấu.

- Ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI): Một số nghiên cứu đã đề xuất sử dụng AI để tối ưu hóa quá trình điều khiển cơ cấu xoay, chẳng hạn như dự đoán các thông số tối ưu dựa trên loại vật liệu và kích thước ống. Các thuật toán

học máy có thể phân tích dữ liệu từ cảm biến để điều chỉnh tốc độ quay và mô-men xoắn, từ đó giảm thiểu khuyết tật sản phẩm [14].

- Thiết kế mô-đun: Để tăng tính linh hoạt, các cơ cấu xoay ống hiện đại được thiết kế theo dạng mô-đun, cho phép dễ dàng thay đổi hoặc nâng cấp các bộ phận như trục xoay, bộ truyền động hoặc hệ thống kẹp ống. Thiết kế này không chỉ giảm chi phí bảo trì mà còn tăng khả năng thích ứng với các yêu cầu sản xuất khác nhau [9].

(*) Mục tiêu của nghiên cứu

Nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế một cơ cấu xoay ống cải tiến, đáp ứng các yêu cầu về độ chính xác, tính linh hoạt và khả năng tự động hóa trong quá trình tạo ống. Cụ thể, mục tiêu bao gồm:

- Phát triển một cơ cấu xoay có khả năng điều chỉnh tốc độ và mô-men xoắn theo thời gian thực, phù hợp với nhiều loại vật liệu và kích thước ống.

- Tích hợp các công nghệ điều khiển hiện đại, như CNC và cảm biến, để đảm bảo sự ổn định và chính xác trong quá trình vận hành.

- Đề xuất một thiết kế mô-đun, giảm chi phí bảo trì và tăng khả năng thích ứng với các dây chuyền sản xuất khác nhau.

- Đánh giá hiệu quả của cơ cấu thông qua mô phỏng và thử nghiệm thực tế, từ đó đưa ra các khuyến nghị cho việc ứng dụng trong công nghiệp.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Các hệ thống tạo ống hiện tại đang đối 

mặt với những yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác hình học, độ bền cơ học và khả năng thích ứng với các kích thước và vật liệu ống khác nhau. Trong đó, cơ cấu xoay ống đóng vai trò then chốt nhằm đảm bảo sự đồng đều trong chuyển động quay, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm. Thiết kế hợp lý cơ cấu xoay là chiến lược hữu hiệu để cải thiện hiệu suất và độ ổn định trong quá trình tạo ống. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm phát triển các cơ cấu truyền động có khả năng đáp ứng đồng thời yêu cầu về độ chính xác cao, tải trọng lớn và khả năng điều chỉnh linh hoạt. Các dạng truyền động như bánh răng, trục vít, dây đai, và đặc biệt là truyền động bằng động cơ servo đã được đề xuất để nâng cao độ ổn định và giảm thiểu sai số trong chuyển động quay. Mỗi phương pháp đều có ưu, nhược điểm riêng: truyền động bánh răng mang lại độ cứng vững cao nhưng tạo tiếng ồn lớn; truyền động đai êm nhưng dễ trượt; trong khi đó, truyền động bằng động cơ servo cho phép điều khiển chính xác nhưng đòi hỏi chi phí đầu tư và bảo trì cao.

Về kết cấu tổng thể, hệ thống gồm:

- Khung chịu lực làm bằng thép hợp kim.
- Bộ gá giữ phôi có khả năng kẹp chắc chắn và điều chỉnh theo đường kính ống.
- Động cơ điện điều khiển bằng biến tần hoặc servo, truyền chuyển động quay cho bánh răng.
- Cảm biến đo tốc độ và góc quay giúp hệ thống điều khiển phản hồi nhanh.

3. MÔ PHỎNG

Mô hình 3D được dựng và thử nghiệm số với các thông số đầu vào tiêu chuẩn cho các loại ống nhôm và thép không gỉ. Kết quả cho thấy:

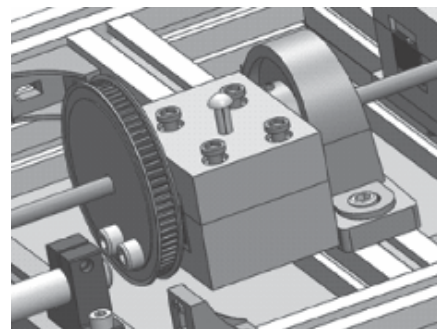
Khi cơ cấu hoạt động ở tốc độ xoay tối

ưu 20 vòng/phút, độ sai lệch hình tròn giảm xuống dưới 0.3 mm.

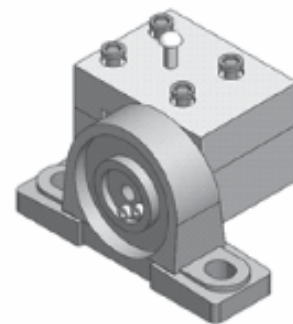
Phân bố ứng suất quanh chu vi ống trở nên đều hơn, hạn chế tập trung ứng suất tại các vị trí dễ biến dạng.

Hệ thống truyền động hoạt động ổn định trong thời gian dài, không phát sinh rung động gây ảnh hưởng đến biên dạng sản phẩm. Những kết quả này cho thấy tính khả thi và hiệu quả của cơ cấu được thiết kế trong môi trường tạo hình kim loại thực tế.

Ngoài ra, một số điều kiện biên như lực kẹp, ma sát giữa ống và cơ cấu kẹp, cũng được đưa vào mô phỏng để phản ánh đúng điều kiện làm việc trong thực tế. Kết quả thu được từ mô phỏng là cơ sở để điều chỉnh lại các thông số thiết kế như đường kính rãnh, độ dày thành phần, hoặc công suất động cơ.



Hình 3.1. Thiết kế cơ cấu xoay bằng bánh răng



Hình 3.2. Thiết kế bộ đỡ cơ cấu xoay

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Để kiểm chứng hiệu quả thiết kế, mô hình cơ cấu xoay được dựng trên phần mềm Solidworks, sau đó chuyển sang ANSYS để phân tích phần tử hữu hạn (FEA). Quá trình mô phỏng tập trung vào ba nhóm yếu tố chính:

✓ Phân tích ứng suất: Kiểm tra mức độ tập trung ứng suất tại các vị trí tiếp xúc giữa phôi ống và cơ cấu gá đỡ, nhằm đảm bảo không gây biến dạng không mong muốn khi xoay.

✓ Phân bố biến dạng: Theo dõi sự thay đổi độ dày thành ống trong quá trình xoay, đặc biệt khi tích hợp với quá trình tạo hình quay ép. Điều này giúp xác định tốc độ quay và lực ép phù hợp để duy trì độ dày đồng đều.

✓ Hiệu ứng dao động và rung động: Mô phỏng điều kiện hoạt động ở các tốc độ quay khác nhau để đánh giá nguy cơ phát sinh rung hoặc mất ổn định khi vận hành thực tế.

Ngoài ra, một số điều kiện biên như lực kẹp, ma sát giữa ống và con lăn đỡ, cũng được đưa vào mô phỏng để phản ánh đúng điều kiện làm việc trong thực tế. Kết quả thu được từ mô phỏng là cơ sở để điều chỉnh lại các thông số thiết kế như đường kính trục, độ dày thành phần, hoặc công suất động cơ.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sau quá trình thiết kế, mô phỏng và đánh giá, cơ cấu xoay ống được đề xuất đã cho thấy những kết quả đáng khích lệ, thể hiện tính khả thi trong ứng dụng thực tiễn cũng như tiềm năng mở rộng trong sản xuất công nghiệp. Phần thảo luận dưới đây sẽ phân tích sâu hơn các khía cạnh kỹ thuật, hiệu suất và ảnh hưởng của thiết kế đến chất lượng sản phẩm.

5.1. Độ chính xác hình học và chất lượng bề mặt

Một trong những mục tiêu chính của thiết kế cơ cấu xoay ống là đảm bảo độ chính xác hình học, cụ thể là độ tròn, độ đồng tâm và độ dày thành ống sau quá trình tạo hình. Qua mô phỏng, kết quả cho thấy khi cơ cấu hoạt động ở tốc độ tối ưu 20 vòng/phút, độ lệch hình tròn được kiểm soát ở mức dưới 0.3 mm – một cải thiện rõ rệt so với các hệ thống xoay cơ khí truyền thống.

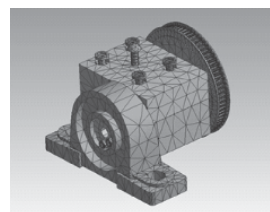
Đây là kết quả của ba yếu tố chính:

- Truyền động bằng động cơ servo: Giúp điều chỉnh tốc độ quay một cách chính xác, duy trì chuyển động ổn định và giảm thiểu dao động tốc độ trong quá trình xoay.

- Cảm biến hồi tiếp: Cảm biến đo tốc độ và góc quay cung cấp dữ liệu liên tục, cho phép hệ thống điều chỉnh thời gian thực nhằm giữ cho chuyển động trơn tru và chính xác.

- Kết cấu cơ khí tối ưu hóa: Bộ gá giữ phôi được thiết kế điều chỉnh linh hoạt theo đường kính ống, đảm bảo lực kẹp đều quanh chu vi, từ đó giảm biến dạng không mong muốn.

Chất lượng bề mặt ống sau khi gia công cũng được cải thiện, do dao động rung thấp hơn và lực tiếp xúc đồng đều hơn giữa ống và cơ cấu gá đỡ.



Hình 5.1 Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS 

5.2. Phân bố ứng suất và biến dạng

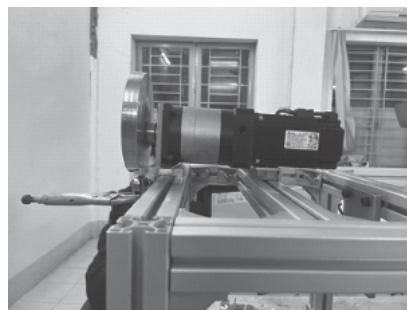
Một điểm nổi bật trong kết quả mô phỏng là khả năng phân bố đều ứng suất quanh chu vi ống. Ứng suất tập trung là nguyên nhân chính gây ra biến dạng không đồng đều, nứt, hoặc mất ổn định hình học trong quá trình tạo hình. Khi sử dụng cơ cấu xoay này, mô phỏng phần tử hữu hạn (FEA) trên ANSYS cho thấy các vùng có ứng suất lớn tập trung chủ yếu tại vị trí tiếp xúc ban đầu giữa ống và con lăn đỡ, nhưng được phân tán nhanh chóng sau một vài chu kỳ quay.

Mô phỏng biến dạng cũng cho thấy độ dày thành ống được duy trì ổn định hơn so với trường hợp không có điều khiển servo. Đây là kết quả trực tiếp của tốc độ quay ổn định và lực kẹp tối ưu, tránh tình trạng trượt hay nén cục bộ.

5.3. Hiệu ứng rung động và độ ổn định hệ thống

Rung động trong quá trình quay là một yếu tố gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến độ chính xác và độ bền thiết bị. Mô phỏng ở các tốc độ quay khác nhau cho thấy cơ cấu đề xuất vận hành ổn định nhất ở khoảng 15-25 vòng/phút. Ở dải tốc độ này, rung động cơ học gần như triệt tiêu, và các thành phần truyền động hoạt động hài hòa mà không phát sinh cộng hưởng.

Đặc biệt, khi tích hợp hệ thống điều khiển phản hồi nhanh, cơ cấu có khả năng tự điều chỉnh và duy trì trạng thái ổn định trong cả quá trình dài vận hành. So với hệ thống sử dụng đai truyền, vốn dễ bị trượt và tạo dao động, cơ cấu này cho độ cứng vững và độ tin cậy cao hơn rõ rệt.



Hình 5.2. Động cơ chính tạo hình ống

5.4. Khả năng tương thích và linh hoạt trong sản xuất

Thiết kế cho phép dễ dàng thay đổi kích thước ống mà không cần điều chỉnh phức tạp. Bộ gá con lăn tự điều chỉnh có thể tương thích với nhiều đường kính và chiều dài ống khác nhau, từ đó giúp mở rộng phạm vi ứng dụng của thiết bị. Đây là một ưu điểm lớn trong các dây chuyền sản xuất đa dạng hóa sản phẩm, nơi việc thay đổi mẫu mã, kích thước là điều thường xuyên.

Hơn nữa, việc sử dụng khung đỡ bằng thép hợp kim và các con lăn chịu lực cao giúp nâng cao độ bền cơ học của toàn bộ hệ thống, sẵn sàng làm việc trong môi trường có tải trọng lớn hoặc thời gian vận hành liên tục.

5.5. Đề xuất cải tiến và hướng phát triển

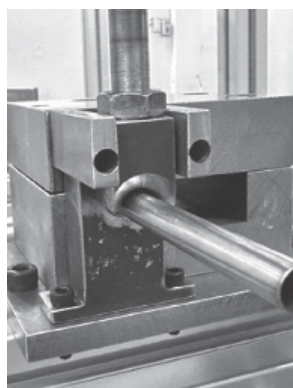
Mặc dù hệ thống đã cho kết quả tích cực trong giai đoạn thử nghiệm, một số điểm có thể được xem xét để cải tiến thêm:

- Tích hợp hệ thống làm mát cục bộ: Giúp giảm nhiệt phát sinh do ma sát trong quá trình quay, đặc biệt với vật liệu có độ cứng cao như inox.

- Tự động hóa quá trình gá kẹp: Sử dụng hệ thống điều khiển thủy lực hoặc khí nén

để tự động điều chỉnh lực kẹp theo từng loại ống, giảm thời gian setup và nâng cao độ chính xác.

- Tối ưu hóa thuật toán điều khiển servo: Áp dụng thuật toán điều khiển thích nghi (adaptive control) giúp hệ thống phản ứng nhanh hơn với các thay đổi tải trọng hoặc độ ma sát trong quá trình vận hành thực tế.



Hình 5.3. Cơ cấu tạo biến dạng ống

6. KẾT LUẬN

Qua quá trình nghiên cứu và thiết kế, cơ cấu xoay ống đề xuất cho thấy những cải tiến đáng kể so với các hệ thống truyền thống cả về mặt hiệu suất lẫn độ tin cậy. So với các giải pháp xoay ống trước đây chủ yếu sử dụng truyền động bánh răng hoặc đai đơn thuần, hệ thống sử dụng động cơ servo kết hợp điều khiển tự động mang lại độ chính xác cao hơn trong điều khiển tốc độ, giảm sai số đồng tâm và cải thiện rõ rệt độ ổn định quay.

Mô hình thiết kế cũng chứng minh được khả năng tương thích tốt với các loại ống có đường kính và khối lượng khác nhau, nhờ kết cấu con lăn tự điều chỉnh và khung đỡ cứng vững. Sự kết hợp giữa mô phỏng động học và phân tích tải trọng trong quá trình thiết kế giúp hệ thống tối ưu về mặt cấu trúc và hiệu năng.

So với các giải pháp có chi phí thấp hơn nhưng độ chính xác kém, mô hình này tuy đầu tư ban đầu cao hơn nhưng có lợi thế vượt trội về tuổi thọ, khả năng bảo trì, và hiệu quả vận hành trong môi trường công nghiệp khắc khe. Khi áp dụng vào thực tế, hệ thống này có thể giảm thời gian chu kỳ sản xuất, giảm lỗi hình học, và nâng cao chất lượng bề mặt sản phẩm ống.

Từ những đánh giá trên, có thể khẳng định rằng thiết kế cơ cấu xoay ống này là giải pháp phù hợp và hiệu quả cho các dây chuyền tạo hình ống hiện đại, góp phần thúc đẩy xu hướng tự động hóa và nâng cao chất lượng trong sản xuất cơ khí chính xác.

(*) 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: Hoàng Trung Kiên, Dương Đăng Danh, Đỗ Văn Hiến, 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: SV2025-349.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ambrogio, G., Filice, L., & Gagliardi, F. (2012), “*Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming*”. *Materials & Design*, 34, 501-508.
- [2]. Allwood, J. M., Music, O., Raithathna, A., & Duncan, S. R. (2009), “*Closed-loop feedback control of product properties in flexible metal forming processes with mobile tools*”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 287-290.
- [3]. Awiszus, B., & Härtel, S. (2010), “*Es läuft rund*”. *Das Unrunddrücken*. UTFscience, 1. <http://www.utfscience.de>
- [4]. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufflou, J., & Allwood, J. (2005), “*Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*”. *CIRP Annals*, 54(2), 623-650.
- [5]. Awiszus, B., & Meyer, F. (2005), “*Metal spinning of non-circular hollow parts*”. In *Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity* (pp. 353-355). Verona, Italy.
- [6]. Ambrogio, G., Costantino, I., De Napoli, L., Filice, L., Fratini, L., & Muzzupappa, M. (2004), “*Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: A numerical and experimental investigation*”. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 501-507.
- [7]. Micari, F., Ambrogio, G., & Filice, L. (2007), “*Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: State of the art and future trends*”. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 390-395.
- [8]. Arai, H. (2006), “*Force-controlled metal spinning machine using linear motors*”. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4031-4036). Orlando, Florida.
- [9]. Araghi, B. T., Manco, G. L., Bambach, M., & Hirt, G. (2009), “*Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming*”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 225-228.
- [10]. Allwood, J. M., & Utsunomiya, H. (2006), “*A survey of flexible forming processes in Japan*”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1939-1960.
- [11]. Härtel, S., & Awiszus, B. (2010), “*Numerical and experimental investigations of production of non-rotationally symmetric hollow parts using sheet metal spinning*”. *Steel Research International*, 81(9), 998-1002.
- [12]. Beyer, U., & Awiszus, B. (2010), “*Flat-clinching – a new possibility for joining different kinds of components in a flexible and effective way to a planar material compound*”. *Steel Research International*, 81(9), 1124-1127.
- [13]. Allwood, J., Kopp, R., Michels, D., Music, O., Öztöp, M., Stanistreet, T., Tekkaya, A., & Tiedemann, I. (2005), “*The technical and commercial potential of an incremental ring rolling process*”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54, 233-236.
- [14]. Hirt, G., Ames, J., Bambach, M., & Kopp, R. (2004), “*Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming*”. *CIRP Annals*, 52(1), 203-206.

THIẾT KẾ MODULE ĐẨY ỐNG CHO MÁY UỐN

DESIGN OF A TUBE PUSHING MODULE FOR A BENDING MACHINE

Trần Công Hiếu, Nguyễn Hải Hoàn, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Quang Sáng*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144063@student.hcmute.edu.vn;

hoannh@hcmute.edu.vn;

hiendv@hcmute.edu.vn;

*sangnq@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Máy uốn ống là thiết bị chuyên dụng, được sử dụng để tạo hình các loại ống kim loại hoặc nhựa theo góc độ yêu cầu, đáp ứng nhu cầu của nhiều ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng và sản xuất. Thiết bị này hoạt động dựa trên lực cơ học, thủy lực hoặc điện, đảm bảo uốn ống mà không gây biến dạng hoặc hư hỏng vật liệu. Máy uốn ống đa dạng về loại hình, từ máy thủ công đơn giản đến các hệ thống tự động hóa tiên tiến, mang lại hiệu suất cao và độ chính xác vượt trội. Nhờ khả năng tạo ra các góc uốn chính xác, máy uốn ống đóng vai trò thiết yếu trong các quy trình sản xuất, lắp đặt và gia công. Việc ứng dụng công nghệ hiện đại vào máy uốn ống không chỉ nâng cao chất lượng sản phẩm mà còn tối ưu hóa thời gian và chi phí sản xuất. Với sự phát triển không ngừng của kỹ thuật, máy uốn ống tiếp tục được cải tiến để đáp ứng các yêu cầu ngày càng khắt khe của ngành công nghiệp, góp phần quan trọng vào sự tiến bộ của các lĩnh vực liên quan.

Từ khóa: Uốn ống; Biến dạng dẻo; Chi tiết dạng ống; Thiết kế cơ cấu đẩy ống; Thiết kế 3D.

ABSTRACT

A pipe bending machine is an essential tool in manufacturing and construction, used to bend pipes and tubes with precision. These machines help shape materials without causing damage, ensuring smooth curves and accurate angles. There are various types, including manual, hydraulic, and CNC-controlled models, each suited for different applications. Industries such as automotive, aerospace, and plumbing rely on pipe bending machines for efficiency and consistency. Advanced technology has improved automation, reducing labor costs and increasing production speed. With their versatility and reliability, pipe bending machines play a crucial role in modern engineering and infrastructure development.

Keywords: Pipe bending machine design; 3D CAD; 3D pipe bending machine model; Pipe pushing module in pipe bending machine; Mechanical design. 

1. TỔNG QUAN

Trong lĩnh vực kỹ thuật cơ khí, thiết kế module đẩy ống là một nhiệm vụ quan trọng, góp phần tối ưu hóa hiệu suất của các hệ thống máy uốn ống được sử dụng rộng rãi trong sản xuất công nghiệp, xây dựng và các ngành kỹ thuật khác [1]. Module đẩy ống đóng vai trò thiết yếu trong việc đảm bảo quá trình dịch chuyển ống diễn ra chính xác, ổn định và hiệu quả, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm, giảm thời gian gia công và tối ưu hóa quy trình sản xuất [2]. Với sự phát triển không ngừng của công nghệ, các yêu cầu về độ chính xác, độ bền và khả năng thích nghi của module đẩy ống ngày càng được nâng cao, đòi hỏi các nhà thiết kế phải tích hợp các giải pháp kỹ thuật tiên tiến vào quá trình phát triển [3]. Bài viết này trình bày một cái nhìn tổng quan về các khía cạnh lý thuyết, thực tiễn và công nghệ liên quan đến thiết kế module đẩy ống, đồng thời thảo luận chi tiết về các yếu tố quan trọng như lực đẩy, vật liệu, độ tin cậy và chi phí sản xuất.

Module đẩy ống không chỉ là một thành phần cơ khí đơn thuần mà còn là một hệ thống tích hợp, đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về cơ học, vật liệu học và công nghệ điều khiển. Các ứng dụng thực tiễn của module này rất đa dạng, từ sản xuất ống dẫn dầu khí, hệ thống cấp nước, đến các cấu kiện xây dựng phức tạp [4]. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các giải pháp thiết kế tối ưu cho module đẩy ống không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn đóng góp vào sự tiến bộ của ngành kỹ thuật cơ khí nói chung [5].

(*) Vai trò của module đẩy ống trong máy uốn

Module đẩy ống là một cơ cấu cơ khí được thiết kế để tạo ra lực đẩy cần thiết, giúp dịch chuyển ống qua các công đoạn uốn, định

hình hoặc xử lý khác trong máy uốn [6]. Trong các hệ thống máy uốn, module này chịu trách nhiệm đảm bảo vị trí của ống được định vị chính xác và lực đẩy được duy trì ổn định, nhằm tránh các lỗi kỹ thuật như biến dạng vật liệu, lệch tâm hoặc nứt gãy [7]. Theo nghiên cứu, hiệu suất của module đẩy ống ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng thành phẩm, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao như sản xuất ống dẫn dầu khí hoặc các cấu kiện xây dựng [8].

Cơ cấu đẩy ống thường bao gồm các thành phần chính như động cơ truyền động, hệ thống dẫn hướng, bộ truyền lực và các cảm biến điều khiển [9]. Các thành phần này cần được thiết kế đồng bộ để đảm bảo khả năng vận hành liên tục trong điều kiện tải trọng cao và môi trường khắc nghiệt, chẳng hạn như nhiệt độ cao, độ ẩm hoặc sự hiện diện của hóa chất ăn mòn [10]. Hơn nữa, module đẩy ống phải đáp ứng các yêu cầu về tốc độ, lực đẩy và khả năng điều chỉnh linh hoạt để phù hợp với nhiều loại ống có kích thước, hình dạng và vật liệu khác nhau, từ kim loại như thép, nhôm đến nhựa công nghiệp [11].

(*) Các yếu tố thiết kế quan trọng

(+) Lực đẩy và tính toán cơ học

Việc xác định lực đẩy là một trong những bước quan trọng nhất trong thiết kế module đẩy ống. Lực đẩy cần được tính toán sao cho đủ lớn để vượt qua lực cản ma sát và các lực kháng khác trong quá trình dịch chuyển ống, nhưng không được vượt quá ngưỡng gây hư hỏng vật liệu hoặc làm mất ổn định hệ thống [12]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng các mô hình cơ học và phần mềm mô phỏng như ANSYS hoặc Solidworks có thể hỗ trợ tối ưu hóa việc tính toán lực đẩy, từ đó giảm

thiếu rủi ro trong quá trình vận hành [13].

Phân tích động lực học của cơ cấu đẩy ống cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu suất. Các yếu tố như gia tốc, quán tính và rung động cần được xem xét kỹ lưỡng để đảm bảo module hoạt động ổn định và không gây ra hiện tượng mài mòn quá mức [14]. Việc tích hợp các bộ giảm chấn hoặc các cơ cấu giảm rung vào thiết kế có thể cải thiện đáng kể hiệu suất và kéo dài tuổi thọ của module, đặc biệt trong các ứng dụng công nghiệp liên tục [14].

(+) Lựa chọn vật liệu

Vật liệu sử dụng cho module đẩy ống cần đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt về độ bền, độ cứng và khả năng chống ăn mòn, đặc biệt khi module hoạt động trong các môi trường khắc nghiệt như nhà máy hóa chất, môi trường biển hoặc ngoài trời [13]. Thép hợp kim, nhôm và các vật liệu composite tiên tiến thường được ưu tiên nhờ đặc tính cơ học vượt trội, khả năng chịu tải cao và trọng lượng nhẹ, giúp giảm tải trọng lên hệ thống truyền động [14]. Tuy nhiên, chi phí của các vật liệu này cũng là một yếu tố cần cân nhắc, đặc biệt trong các ứng dụng sản xuất hàng loạt, nơi tối ưu hóa chi phí là ưu tiên hàng đầu [13].

Việc lựa chọn vật liệu không chỉ dựa trên đặc tính cơ học mà còn cần xem xét khả năng gia công, khả năng tái chế và tác động môi trường. Các nghiên cứu gần đây đã nhấn mạnh tầm quan trọng của việc sử dụng vật liệu bền vững trong thiết kế cơ khí để đáp ứng các tiêu chuẩn môi trường ngày càng khắt khe [14].

(+) Độ tin cậy và tuổi thọ

Độ tin cậy của module đẩy ống là yếu tố quyết định khả năng vận hành liên tục của

toàn bộ hệ thống máy uốn. Các phương pháp bảo trì dự đoán, kết hợp với việc tích hợp cảm biến giám sát trạng thái, có thể phát hiện sớm các dấu hiệu hỏng hóc, từ đó kéo dài tuổi thọ của module và giảm thiểu nguy cơ ngừng máy đột xuất [13]. Ngoài ra, việc thiết kế các cơ cấu có khả năng chịu tải dư cũng giúp tăng cường độ bền, đặc biệt trong các điều kiện vận hành không lý tưởng như dao động nhiệt độ hoặc tải trọng thay đổi liên tục [14].

(+) Tối ưu hóa chi phí

Trong bối cảnh cạnh tranh công nghiệp, tối ưu hóa chi phí thiết kế và sản xuất module đẩy ống là một yêu cầu tất yếu. Các phương pháp như thiết kế mô-đun hóa, sử dụng linh kiện tiêu chuẩn và áp dụng công nghệ sản xuất tiên tiến như in 3D có thể giảm đáng kể chi phí mà vẫn đảm bảo chất lượng [13]. Việc sử dụng các kỹ thuật tối ưu hóa đa mục tiêu, cân bằng giữa hiệu suất, độ bền và chi phí, cũng được xem là một hướng tiếp cận hiệu quả trong thiết kế module đẩy ống [14].

(*) Các tiến bộ công nghệ gần đây

Sự phát triển của công nghệ đã mang lại nhiều cải tiến đáng kể trong thiết kế module đẩy ống. Một trong những xu hướng nổi bật là việc tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy vào quá trình thiết kế và vận hành [11]. Các thuật toán AI có thể phân tích dữ liệu vận hành, dự đoán các lỗi tiềm ẩn và đề xuất các giải pháp tối ưu, từ đó nâng cao hiệu suất và giảm thời gian ngừng máy [11].

Hệ thống điều khiển tự động và robot hóa cũng đang thay đổi cách thức hoạt động của module đẩy ống. Các hệ thống này cho phép điều chỉnh lực đẩy và tốc độ theo thời gian thực, đảm bảo độ chính xác cao và khả năng

năng thích nghi với các yêu cầu sản xuất thay đổi [12]. Ngoài ra, việc sử dụng các vật liệu thông minh, chẳng hạn như hợp kim nhớ hình, đã mở ra tiềm năng cải thiện khả năng thích nghi của module trong các điều kiện vận hành phức tạp, chẳng hạn như thay đổi nhiệt độ hoặc áp suất [13].

(*) Thách thức và định hướng nghiên cứu

Mặc dù đạt được nhiều tiến bộ, thiết kế module đẩy ống vẫn đối mặt với các thách thức lớn. Một trong những vấn đề quan trọng là làm thế nào để cân bằng giữa hiệu suất cao và chi phí thấp, đặc biệt trong các ứng dụng sản xuất quy mô lớn [14]. Việc đảm bảo khả năng tương thích của module với các loại ống có kích thước, vật liệu và hình dạng khác nhau cũng đòi hỏi các giải pháp thiết kế linh hoạt hơn [13].

Trong tương lai, các nghiên cứu cần tập trung vào phát triển các module đẩy ống thông minh, có khả năng tự điều chỉnh dựa trên dữ liệu thời gian thực thu thập từ cảm biến và hệ thống điều khiển [12]. Đồng thời, việc khám phá các vật liệu mới, chẳng hạn như vật liệu nano hoặc composite cải tiến, cùng với các công nghệ sản xuất tiên tiến như in 3D kim loại, sẽ tiếp tục là động lực thúc đẩy sự đổi mới trong lĩnh vực này [11]. Các giải pháp thiết kế bền vững, giảm thiểu tác động môi trường, cũng cần được ưu tiên để đáp ứng các yêu cầu toàn cầu về phát triển bền vững [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Máy uốn ống hoạt động dựa trên nguyên lý biến dạng dẻo của vật liệu, giúp ống đạt được hình dạng mong muốn mà không làm mất đi độ bền. Khi uốn, ống trải qua quá trình biến dạng đàn hồi và dẻo, tùy vào lực tác động và đặc

tính vật liệu. Bán kính uốn, phương pháp uốn và tính chất vật liệu đều ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm. Có nhiều phương pháp uốn như uốn quay trục, uốn ép khuôn, hay uốn cảm ứng nhiệt, mỗi phương pháp có ưu điểm riêng. Việc kiểm soát ma sát và lực tác động đảm bảo quá trình uốn diễn ra chính xác, hạn chế nứt gãy, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật trong sản xuất và xây dựng.

2.1. Quá trình thiết kế module đẩy ống trong máy uốn ống bằng CAD 3D

Phần mềm 3D được ứng dụng rộng rãi trong thiết kế module đẩy ống của máy uốn ống, giúp tối ưu hóa cấu trúc và cơ chế hoạt động. Nhờ mô phỏng chính xác, kỹ sư có thể kiểm tra lực tác động, tối ưu đường dẫn chuyển động và dự đoán biến dạng vật liệu, đảm bảo hiệu suất cao và giảm chi phí sản xuất.

Trước khi bắt tay vào thiết kế, cần xác định các yêu cầu quan trọng như:

- + Đường kính ống: Phụ thuộc vào lực uốn và kích thước bộ truyền động;
- + Kiểu ống: Tròn, vuông;
- + Vật liệu: Nhôm, thép, đồng, Inox.

2.2. Nguyên lý hoạt động

Tùy theo yêu cầu của sản phẩm cần đạt được có thể áp dụng các nguyên lý truyền động sau đây vào thiết kế module đẩy ống trong máy uốn ống:

- Truyền động thủy lực – Sử dụng xi lanh thủy lực để tạo lực đẩy mạnh và ổn định, phù hợp với các ứng dụng yêu cầu lực lớn và điều khiển chính xác.

- Truyền động khí nén – Được dùng khi cần tốc độ cao và lực trung bình, thường áp dụng trong các hệ thống tự động hóa với chi phí vận hành thấp.

- Truyền động điện – Dùng động cơ điện kết hợp cơ cấu vít me hoặc bánh răng để kiểm soát chuyển động chính xác, giúp cải thiện hiệu suất và khả năng lặp trình tự động.

- Truyền động cơ khí – Sử dụng cam, lò xo hoặc hệ bánh răng giúp đảm bảo tính đơn giản, giảm chi phí nhưng có thể hạn chế về khả năng điều chỉnh lực.

- Truyền động servo – Kết hợp cảm biến và bộ điều khiển servo để duy trì vị trí và tốc độ ổn định, nâng cao độ chính xác trong quá trình uốn.

2.3. Xây dựng mô hình 3D

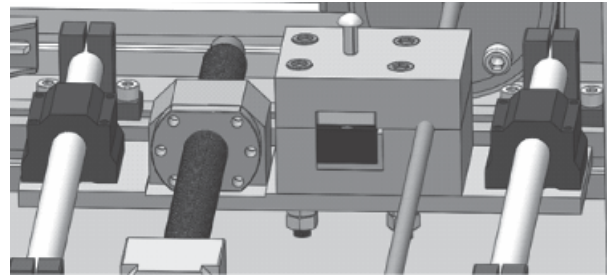
Mô hình 3D được dựng và thử nghiệm số với các thông số đầu vào tiêu chuẩn cho các loại ống nhôm và thép không gỉ, Inox. Kết quả cho thấy:

- Module tạo ra lực đủ lớn để di chuyển ống mà không gây biến dạng hoặc lệch hướng.

- Có khả năng thay đổi tốc độ đẩy để phù hợp với từng loại vật liệu và yêu cầu gia công.

- Module kiểm soát vị trí đẩy chính xác để đảm bảo ống được đưa vào đúng vị trí uốn.

- Các bộ phận của module được chế tạo từ vật liệu chịu lực tốt để đảm bảo tuổi thọ dài và độ bền cao.



Hình 1. Module đẩy ống bằng vít me

2.4. Kiểm tra và mô phỏng hoạt động

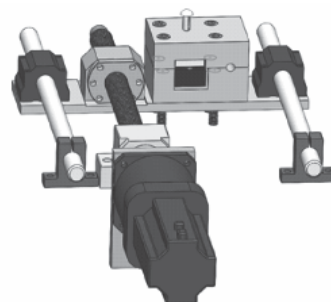
Sử dụng mô hình 3D để thực hiện mô phỏng thông qua các công cụ như Ansys:

- Phân bố lực và ứng suất – Kiểm tra lực tác động lên module, giúp xác định vùng chịu tải cao và tránh hiện tượng biến dạng quá mức.

- Độ bền vật liệu – Phân tích mô phỏng theo tiêu chuẩn độ bền, đánh giá khả năng chịu lực của các thành phần như khung đỡ, xi lanh và bộ truyền động.

- Chuyển động và động lực học – Mô phỏng sự dịch chuyển của module đẩy, kiểm tra tốc độ, độ chính xác và khả năng hoạt động ổn định trong điều kiện vận hành thực tế.

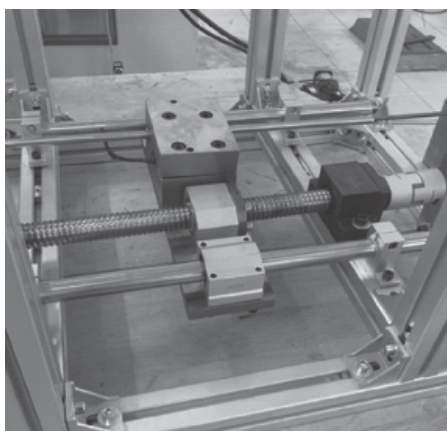
- Kiểm tra nhiệt độ và ma sát – Đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ và ma sát trong quá trình uốn, đảm bảo tuổi thọ của các bộ phận cơ khí.



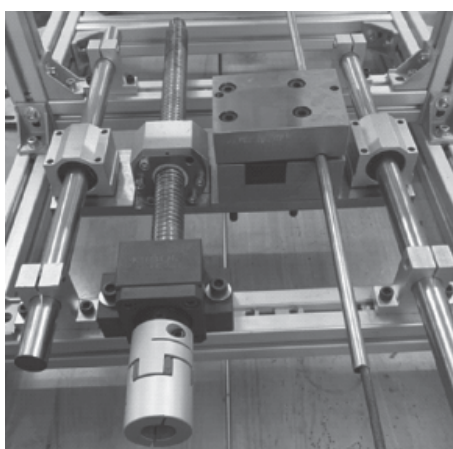
Hình 2. Hệ thống dẫn động cho module đẩy ống

3. THỰC NGHIỆM VÀ KIỂM TRA THIẾT KẾ

Việc ứng dụng phần mềm thiết kế 3D vào quá trình phát triển module đẩy ống cho máy uốn ống mang lại nhiều lợi ích vượt trội, giúp kỹ sư tối ưu hóa thiết kế và nâng cao hiệu quả sản xuất. Các phần mềm như Solidworks, ANSYS hay CATIA cung cấp khả năng mô phỏng trực quan, cho phép phân tích cấu trúc, đánh giá lực tác động và tinh chỉnh thiết kế trước khi chế tạo. Điều này giúp giảm đáng kể chi phí liên quan đến thử nghiệm thực tế, đồng thời rút ngắn thời gian phát triển sản phẩm, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của ngành kỹ thuật cơ khí.



Hình 3. Lắp ráp bộ phận giữ ống



Hình 4. Lắp khớp nối cho vít me

Một ưu điểm nổi bật của phần mềm 3D là khả năng mô phỏng động lực học, hỗ trợ kỹ sư kiểm tra và điều chỉnh cơ chế truyền động của module đẩy ống. Các phân tích về gia tốc, quán tính và rung động đảm bảo module hoạt động ổn định, tránh các lỗi như lệch tâm hoặc biến dạng ống trong quá trình uốn. Hơn nữa, phần mềm 3D giúp phát hiện sớm các sai sót thiết kế, chẳng hạn như điểm yếu cấu trúc hoặc sự không tương thích giữa các bộ phận. Nhờ đó, độ bền và tuổi thọ của thiết bị được cải thiện đáng kể, đảm bảo sản phẩm cuối cùng đạt chất lượng tối ưu và vận hành tin cậy trong các ứng dụng thực tế, từ sản xuất ống dẫn dầu khí đến cấu kiện xây dựng.



Hình 5. Module đẩy ống được lắp lên thân máy

Quá trình lắp ráp module đẩy ống cũng được hỗ trợ mạnh mẽ bởi thiết kế 3D. Mô hình 3D và bản vẽ chi tiết cung cấp hướng dẫn chính xác cho việc lắp ráp các bộ phận quan trọng. Cụ thể, lắp ráp vít me (Hình 3) yêu cầu độ chính xác cao để đảm bảo truyền động mượt mà, tránh mài mòn hoặc kẹt cơ cấu. Bộ phận giữ ống (Hình 4) được thiết kế để cố định ống chắc chắn, ngăn ngừa dịch chuyển không mong muốn trong quá trình uốn, từ đó tăng độ chính

xác của sản phẩm. Khớp nối cho vít me (Hình 5) đóng vai trò kết nối các thành phần truyền động, đòi hỏi sự ăn khớp hoàn hảo để duy trì hiệu suất ổn định. Cuối cùng, việc lắp đặt module đẩy ống lên thân máy (Hình 6) dựa trên mô phỏng 3D, đảm bảo sự tương thích và ổn định của toàn bộ hệ thống máy uốn.

Nhờ phần mềm 3D, kỹ sư không chỉ cải thiện hiệu quả thiết kế mà còn giảm thiểu rủi ro trong sản xuất. Kết quả là module đẩy ống đạt được sự cân bằng giữa hiệu suất, độ bền và chi phí, đáp ứng các tiêu chuẩn công nghiệp hiện đại. Công nghệ này tiếp tục đóng vai trò quan trọng trong việc đổi mới và nâng cao chất lượng các hệ thống máy uốn ống.

4. CÁC LƯU Ý KỸ THUẬT KHI THIẾT KẾ MODULE ĐẨY ỐNG TRONG MÁY UỐN ỐNG

- Cơ cấu truyền động – Lựa chọn phương pháp truyền động phù hợp (thủy lực, khí nén, điện, servo) để đảm bảo lực đẩy ổn định và chính xác.

- Kết cấu chịu lực – Thiết kế khung và bộ phận chịu lực sao cho đáp ứng được tải trọng và tránh biến dạng trong quá trình vận hành.

- Tối ưu hóa vật liệu – Chọn vật liệu có độ bền cao, khả năng chịu mài mòn tốt, đảm bảo tuổi thọ của module.

- Độ chính xác gia công – Đảm bảo sai số gia công nhỏ để module hoạt động trơn tru, tránh rung lắc hoặc sai lệch vị trí.

- Tích hợp cảm biến và điều khiển – Ứng dụng hệ thống cảm biến để theo dõi vị trí và tốc độ, giúp điều chỉnh động lực học chính xác.

- Phân tích động học và ứng suất – Sử dụng phần mềm mô phỏng như Ansys để kiểm tra độ bền, vùng ứng suất cao và tối ưu hóa thiết kế.

- Kiểm soát ma sát và hao mòn – Đánh giá hệ số ma sát, bôi trơn các bộ phận chuyển động để giảm lực cản và tránh hao mòn nhanh.

5. KẾT LUẬN

Việc thiết kế module đẩy ống cho máy uốn ống là một bước quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả sản xuất và đảm bảo độ chính xác trong quá trình gia công. Module này không chỉ cần đáp ứng yêu cầu về lực đẩy mạnh, tốc độ điều chỉnh linh hoạt và độ chính xác cao mà còn phải có kết cấu bền vững để đảm bảo hoạt động ổn định lâu dài. Bên cạnh đó, việc tích hợp hệ thống điều khiển tự động và cảm biến thông minh giúp tối ưu hóa hiệu suất vận hành, giảm thiểu sai số và nâng cao tính linh hoạt khi xử lý nhiều loại ống khác nhau.

Nhìn chung, một module đẩy ống được thiết kế tốt sẽ góp phần quan trọng vào quá trình uốn ống, đảm bảo chất lượng sản phẩm, giảm thời gian sản xuất và tối ưu hóa nguồn lực. Việc tiếp tục nghiên cứu và cải tiến module này theo hướng tự động hóa và nâng cao độ chính xác sẽ mang lại lợi ích lớn cho các ngành công nghiệp liên quan.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Văn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Trần Công Hiếu, Nguyễn Hải Hoàn, Đỗ Văn Hiến, 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 – 350.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**

Ngày phản biện: **16/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ahmadi, S., Eivani, A. R., & Akbarzadeh, A. (2009), “*Experimental and analytical studies on the prediction of forming limit diagrams*”. Computational Materials Science, 44(5), 1252-1257.
- [2]. Armstrong, D. E., Dunn, A. J. J., & Dunn, T. J. J. (1954), “*Cold tube bending*” (U.S. Patent No. 2907102).
- [3]. Barlat, F. (1987), “*Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals*”. Materials Science and Engineering, 91, 55-72.
- [4]. Chen, H., Wang, H., El-Aty, A. A., Qin, Y., Li, J., Zhang, Y., Li, T., & Guo, X. (2021), “*Impact of bending dies with different friction forms on forming force and quality of pipes manufactured by free bending technology*”. Chinese Journal of Aeronautics, 34, 253-264.
- [5]. Cheng, C., Chen, H., Guo, J., Guo, X., & Shi, Y. (2021), “*Investigation on the influence of mandrel on the forming quality of thin-walled pipe during free bending process*”. Journal of Manufacturing Processes, 72, 215-226.
- [6]. Cheng, X., Guo, X., Tao, J., Xu, Y., El-Aty, A. A., & Liu, H. (2019), “*Investigation of the effect of relative thickness (t/d) on the formability of the AA6061 pipes during free bending process*”. International Journal of Mechanical Sciences, 160, 103-113.
- [7]. El-Aty, A. A., Guo, X., Lee, M.-G., Tao, J., Hou, Y., Hu, S., Li, T., Wu, C., & Yang, Q. (2023), “*A review on flexibility of free bending forming technology for manufacturing thin-walled complex-shaped metallic pipes*”. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 6(2), 165-188.
- [8]. El Megharbel, A., El Nasser, G. A., & El Domiaty, A. (2008), “*Bending of pipe and section made of strain-hardening materials*”. Journal of Materials Processing Technology, 203, 372-380.
- [9]. Guo, X., Xiong, H., Li, H., Xu, Y., Ma, Z., El-Aty, A. A., Ma, Y., & Jin, K. (2018), “*Forming characteristics of pipe free-bending with small bending radii based on a new spherical connection*”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 133, 72-84.
- [10]. Guo, X., Xiong, H., Xu, Y., El-Aty, A. A., Ma, Y., Zhao, Y., & Zhang, S. (2018), “*U-R relationship prediction method for aluminum alloy circular pipe free-bending process based on sensitivity analysis of material parameters*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99, 1967-1977.
- [11]. Jiang, J., Guo, X., Shen, Y., Xu, Y., Wang, Z., Li, H., & Tao, J. (2023), “*Effect of bending radius on deformation behavior of H62 brass tubes in a less constrained free bending process*”. International Journal of Material Forming, 16(50).
- [12]. Li, Y., Li, A., Yue, Z., Qiu, L., Badreddine, H., Gao, J., & Wang, Y. (2020), “*Springback prediction of AL6061 pipe in free bending process based on finite element and analytic methods*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 109, 1789-1799.
- [13]. Michalczyk, J., Gontarz, A., Wiewiórowska, S., & Winiarski, G. (2023), “*Mandrel-free bending of tubes with small radii: A theoretical and experimental study*”. Advances in Science and Technology Research Journal, 17(4), 189-205.
- [14]. Murata, M., Kuboki, T., Takahashi, K., et al. (2008), “*Effect of hardening exponent on tube bending*”. Journal of Materials Processing Technology, 201, 189-192.

THIẾT KẾ MÔ HÌNH TẠO HÌNH MẶT CONG BẰNG PHƯƠNG PHÁP CHẤN

DESIGN OF A CURVED SURFACE FORMING MODEL USING THE BENDING METHOD

Phan Hữu Hoàng Ninh, Nguyễn Trọng Hiếu, Trần Quốc Hùng, Nguyễn Trà Kim Quyên*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144240@student.hcmute.edu.vn; hieunt@hcmute.edu.vn;

hungtq@hcmute.edu.vn; *quyenntk@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu về thiết kế mô hình tạo hình mặt cong bằng phương pháp chấn trong gia công kim loại tấm, một giải pháp kinh tế và hiệu quả để sản xuất các chi tiết có bề mặt cong mà không yêu cầu độ cong liên tục phức tạp như dập sâu. Phương pháp chấn dựa trên biến dạng dẻo, sử dụng lực tập trung từ chày và cối để tạo đường gấp chính xác, đòi hỏi kiểm soát chặt chẽ các thông số như góc uốn, bán kính uốn, và tính chất vật liệu. Các yếu tố ảnh hưởng bao gồm tính chất vật liệu, thông số hình học, thiết kế dụng cụ chấn, và điều kiện quá trình. Bài báo đề xuất các phương pháp thiết kế hiện đại như phân tích phần tử hữu hạn (FEA), thiết kế dựa trên hình học, và ứng dụng trí tuệ nhân tạo để tối ưu hóa quy trình. Tuy nhiên, thách thức như đàn hồi ngược và độ chính xác của bề mặt cong phức tạp vẫn cần giải quyết. Tích hợp với công nghệ sản xuất thông minh được xem là hướng phát triển tiềm năng, nâng cao hiệu quả và khả năng ứng dụng của phương pháp chấn trong công nghiệp hiện đại.

Từ khóa: Máy chấn; Kim loại; Thiết kế máy; Uốn ống; Ứng suất; Mô hình dạng khung.

ABSTRACT

The paper presents a study on the design of a model for forming curved surfaces using the bending method in sheet metal processing, offering an economical and effective solution for producing components with curved surfaces that do not require complex continuous curvature, as seen in deep drawing. The bending method relies on plastic deformation, utilizing concentrated force from the punch and die to create precise fold lines, necessitating strict control of parameters such as bending angle, bending radius, and material properties. Influencing factors include material characteristics, geometric parameters, bending tool design, and process conditions. The paper proposes modern design approaches, such as finite element analysis (FEA), geometry-based design, and the application of artificial intelligence to optimize the process. However, challenges such as springback and the accuracy of complex curved surfaces still require solutions. Integration with smart manufacturing technologies is considered a promising development direction, enhancing the efficiency and applicability of the bending method in modern industry.

Keywords: Press brake; Metal; Machine design; Pipe forming; Stress; Wireframe.



1. TỔNG QUAN

Trong lĩnh vực gia công kim loại tấm, việc tạo hình các bề mặt cong luôn là một thách thức kỹ thuật đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa thiết kế hình học chính xác, lựa chọn vật liệu phù hợp và kiểm soát quá trình biến dạng một cách hiệu quả [1]. Phương pháp chấn, với nguyên lý sử dụng lực cơ học tập trung để tạo ra biến dạng uốn tại các vị trí cụ thể trên tấm kim loại, đã nổi lên như một giải pháp kinh tế và khả thi để sản xuất các chi tiết có bề mặt cong. Đặc biệt, phương pháp này tỏ ra hiệu quả trong các trường hợp không yêu cầu độ cong liên tục phức tạp như trong quy trình dập sâu, giúp giảm thiểu chi phí sản xuất và tăng tính linh hoạt trong thiết kế [2]. Tổng quan này sẽ trình bày một cách chi tiết các khía cạnh liên quan đến thiết kế mô hình tạo hình mặt cong bằng phương pháp chấn, bao gồm cơ sở lý thuyết, các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình, các phương pháp thiết kế hiện đại, và những thách thức kỹ thuật mà các nhà nghiên cứu và kỹ sư phải đối mặt trong việc ứng dụng công nghệ này.

(*) Cơ sở lý thuyết của phương pháp chấn

Phương pháp chấn là một kỹ thuật gia công kim loại tấm phổ biến, trong đó lực cơ học được áp dụng thông qua hệ thống chày và cối để tạo ra các đường gấp hoặc biến dạng uốn tại các vị trí được xác định trước trên bề mặt tấm kim loại [3]. Quá trình này dựa trên cơ chế biến dạng dẻo, trong đó vật liệu kim loại vượt qua giới hạn chảy dưới tác động của lực tập trung, dẫn đến sự thay đổi hình dạng vĩnh viễn mà không gây tổn hại đến tính toàn vẹn cấu trúc của vật liệu [4]. Các thông số quan trọng trong quá trình chấn bao gồm góc uốn, bán kính uốn, lực chấn cần thiết, và các đặc tính cơ học của vật liệu như độ bền kéo, độ dẫn dài, và mô

đun đàn hồi. Những yếu tố này cần được tính toán và kiểm soát cẩn thận để đảm bảo rằng sản phẩm cuối cùng đạt được độ chính xác hình học và chất lượng bề mặt mong muốn [5]. So với các phương pháp gia công khác như dập sâu hay ép thủy tĩnh, phương pháp chấn có ưu điểm vượt trội về chi phí vận hành và thiết bị thấp, đồng thời cho phép tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao. Tuy nhiên, để đạt được các bề mặt cong phức tạp, quá trình chấn đòi hỏi thiết kế các chuỗi gấp liên tiếp với sự kiểm soát chặt chẽ về góc uốn và vị trí gấp, điều này đặt ra yêu cầu cao về mô hình hóa hình học và phân tích cơ học chính xác [6].

(*) Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình tạo hình mặt cong

Quá trình tạo hình mặt cong bằng phương pháp chấn chịu ảnh hưởng từ nhiều yếu tố, mỗi yếu tố đều đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng và hiệu quả của sản phẩm cuối cùng.

(*) Tính chất vật liệu

Tính chất cơ học của vật liệu, bao gồm độ bền, độ cứng, tính đẳng hướng, và khả năng chịu biến dạng, là yếu tố quyết định khả năng tạo hình và chất lượng của bề mặt cong [7]. Ví dụ, các hợp kim nhôm thường có đặc tính dễ uốn hơn so với thép không gỉ, giúp chúng phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu biến dạng lớn. Tuy nhiên, nhôm cũng có xu hướng xuất hiện các khuyết tật như nứt gãy nếu bán kính uốn quá nhỏ hoặc lực chấn không được kiểm soát chính xác [8]. Do đó, việc lựa chọn vật liệu phù hợp với yêu cầu hình học cụ thể và ứng dụng cuối cùng của sản phẩm là một bước quan trọng trong quá trình thiết kế, đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về các đặc tính vật liệu và hành vi của chúng dưới tác động của lực chấn.

(*) Thông số hình học

Các thông số hình học, bao gồm độ dày của tấm kim loại, bán kính uốn, và góc uốn, có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và chất lượng của bề mặt cong [9]. Những tấm kim loại có độ dày lớn thường yêu cầu lực chần mạnh hơn, đồng thời có nguy cơ gặp phải hiện tượng đàn hồi ngược (springback), làm giảm độ chính xác hình học của chi tiết sau khi chần [10]. Để khắc phục vấn đề này, các nhà thiết kế thường sử dụng các công cụ mô phỏng số để tối ưu hóa các thông số hình học, đảm bảo rằng sản phẩm cuối cùng đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật nghiêm ngặt.

(*) Thiết kế dụng cụ chần

Hình dạng và kích thước của chày và cối trong hệ thống chần ảnh hưởng lớn đến cách lực được phân bố trên tấm kim loại và chất lượng bề mặt sau quá trình gia công [11]. Các dụng cụ chần được thiết kế đặc biệt, chẳng hạn như cối có rãnh hình chữ V hoặc chữ U, có thể cải thiện khả năng kiểm soát biến dạng, giảm thiểu các khuyết tật như nứt hoặc biến dạng không mong muốn, đồng thời nâng cao độ chính xác của chi tiết [12]. Việc thiết kế dụng cụ chần đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng về loại vật liệu, độ dày tấm, và các yêu cầu cụ thể của sản phẩm.

(*) Điều kiện quá trình

Các điều kiện vận hành trong quá trình chần, như tốc độ chần, nhiệt độ môi trường, và việc sử dụng chất bôi trơn, cũng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định chất lượng của bề mặt cong [13]. Chất bôi trơn phù hợp có thể giảm ma sát giữa tấm kim loại và dụng cụ chần, từ đó cải thiện chất lượng bề mặt, giảm hao mòn dụng cụ, và tăng tuổi thọ của hệ thống chần [14]. Ngoài ra, việc kiểm soát tốc độ chần

và nhiệt độ giúp đảm bảo rằng vật liệu không bị biến dạng quá mức hoặc xuất hiện các khuyết tật không mong muốn.

(*) Các phương pháp thiết kế mô hình tạo hình mặt cong

Để đáp ứng các yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác và phức tạp của các bề mặt cong, nhiều phương pháp thiết kế hiện đại đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực này.

(*) Phân tích phần tử hữu hạn (FEA)

Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) là một công cụ mạnh mẽ được sử dụng để mô phỏng quá trình chần và dự đoán các đặc trưng của bề mặt cong, bao gồm phân bố ứng suất, biến dạng, và hiện tượng đàn hồi ngược [1]. Các phần mềm như ABAQUS, ANSYS, hoặc LS-DYNA cho phép các nhà thiết kế tối ưu hóa các thông số chần trước khi tiến hành sản xuất thực tế, từ đó giảm thiểu chi phí và thời gian liên quan đến các thử nghiệm vật lý [2]. FEA không chỉ giúp dự đoán hành vi của vật liệu mà còn hỗ trợ trong việc thiết kế dụng cụ chần và xác định các chuỗi gấp tối ưu để đạt được hình dạng mong muốn.

(*) Thiết kế dựa trên hình học

Các phương pháp thiết kế dựa trên hình học tập trung vào việc xác định các đường gấp và góc uốn cần thiết để tái tạo chính xác bề mặt cong mục tiêu [3]. Các thuật toán tối ưu hóa, như thuật toán di truyền hoặc lập trình tuyến tính, được sử dụng để tìm ra chuỗi gấp tối ưu, đảm bảo độ chính xác về hình học và hiệu quả trong quá trình sản xuất [4]. Phương pháp này đặc biệt hữu ích khi cần tạo ra các bề mặt cong phức tạp với nhiều đường gấp liên tiếp, đòi hỏi

sự phối hợp chặt chẽ giữa thiết kế và sản xuất.

(*) Ứng dụng trí tuệ nhân tạo

Trong những năm gần đây, trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy đã được tích hợp vào quá trình thiết kế mô hình chân để dự đoán và tối ưu hóa các thông số gia công [5]. Các mô hình AI có khả năng phân tích dữ liệu từ các thí nghiệm trước đó, từ đó đề xuất các thông số chân tối ưu, giảm thời gian thiết kế và nâng cao chất lượng sản phẩm. Sự kết hợp giữa AI và các công cụ mô phỏng số đang mở ra những cơ hội mới để cải thiện hiệu quả và độ chính xác của phương pháp chân.

(*) Thách thức kỹ thuật và hướng phát triển

Mặc dù phương pháp chân mang lại nhiều lợi ích về chi phí và tính linh hoạt, nhưng vẫn tồn tại một số thách thức kỹ thuật cần được giải quyết để nâng cao hiệu quả ứng dụng.

(*) Hiện tượng đàn hồi ngược

Hiện tượng đàn hồi ngược, trong đó tấm kim loại có xu hướng trở lại hình dạng ban đầu sau khi lực chân được loại bỏ, là một vấn đề phổ biến, đặc biệt khi gia công các vật liệu có độ bền cao hoặc tấm kim loại dày [6]. Để khắc phục, các kỹ thuật như chân quá mức (overbending) hoặc sử dụng các mô hình dự đoán đàn hồi ngược dựa trên phân tích phần tử hữu hạn đã được đề xuất và áp dụng [7]. Những giải pháp này giúp cải thiện độ chính xác hình học và giảm thiểu sai lệch trong sản phẩm cuối cùng.

(*) Độ chính xác của bề mặt cong phức tạp

Việc tạo ra các bề mặt cong phức tạp đòi hỏi sự phối hợp chính xác giữa nhiều bước gấp

liên tiếp, điều này làm tăng độ phức tạp của cả thiết kế và sản xuất [8]. Các phương pháp thiết kế thích nghi (adaptive design) và tự động hóa quy trình đang được nghiên cứu để giải quyết vấn đề này, cho phép điều chỉnh linh hoạt các thông số chân dựa trên phản hồi từ quá trình sản xuất [9]. Những tiến bộ trong lĩnh vực này hứa hẹn sẽ nâng cao khả năng tạo hình các chi tiết có độ phức tạp cao.

(*) Tích hợp với công nghệ sản xuất thông minh

Trong bối cảnh cách mạng công nghiệp 4.0, việc tích hợp phương pháp chân với các hệ thống sản xuất thông minh, chẳng hạn như Internet vạn vật (IoT) và phân tích dữ liệu lớn, đang trở thành một hướng phát triển đầy tiềm năng [10]. Các hệ thống này cho phép giám sát thời gian thực các thông số chân, từ đó điều chỉnh nhanh chóng để đạt được hiệu quả tối ưu và giảm thiểu lỗi trong quá trình sản xuất. Sự phát triển của các công nghệ này không chỉ cải thiện hiệu suất mà còn mở rộng phạm vi ứng dụng của phương pháp chân trong các ngành công nghiệp hiện đại.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phương pháp chân (bending) là một kỹ thuật gia công kim loại tấm phổ biến, sử dụng lực tác động (thường bởi máy chân) để làm biến dạng dẻo tấm kim loại, tạo thành các biên dạng theo yêu cầu. Phương pháp này không loại bỏ vật liệu mà thay đổi hình dạng thông qua uốn cong. Khi chân nhiều lần liên tiếp với các góc nhỏ, ta có thể tạo ra một chuỗi các đoạn cong nhỏ ghép lại, gần tiệm cận với mặt cong thực tế. Phương pháp này được gọi là “chân đa điểm” hoặc “chân liên tiếp để tạo mặt cong”.

3. QUY TRÌNH THIẾT KẾ MÁY CHẤN

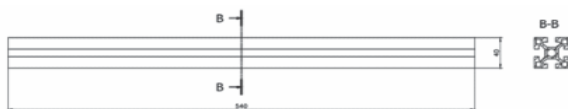
3.1. Phân tích yêu cầu kỹ thuật

Máy chấn được thiết kế với chiều dài chấn tối đa là 22 mm, phù hợp cho các ứng dụng tạo hình chi tiết nhỏ, yêu cầu độ chính xác cao. Kích thước này cho phép xử lý các sản phẩm có biên dạng cong hoặc gấp khúc trong phạm vi nhỏ, thường được sử dụng trong các ngành như điện tử, cơ khí chính xác hoặc sản phẩm tiêu dùng mini. Vật liệu sử dụng để chấn bao gồm nhôm và thép, với độ dày từ 0.5 mm đến 1 mm. Nhôm là vật liệu nhẹ, dễ gia công và có khả năng chống ăn mòn tốt, thích hợp cho các chi tiết yêu cầu trọng lượng nhẹ. Trong khi đó, thép với độ cứng cao hơn sẽ phù hợp với các chi tiết cần độ bền cơ học cao hơn. Do phạm vi độ dày vật liệu tương đối mỏng, máy cần đảm bảo lực chấn phù hợp để không làm biến dạng hoặc gây hư hỏng bề mặt vật liệu trong quá trình gia công. Điều này đặt ra yêu cầu về tính toán lực chấn chính xác và thiết kế dao chấn phù hợp.

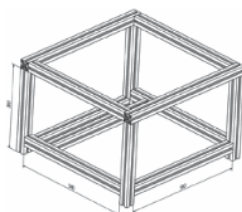
3.2. Thiết kế phần cơ khí

a. Thiết kế khung máy

Lựa chọn vật liệu: Nhôm định hình.



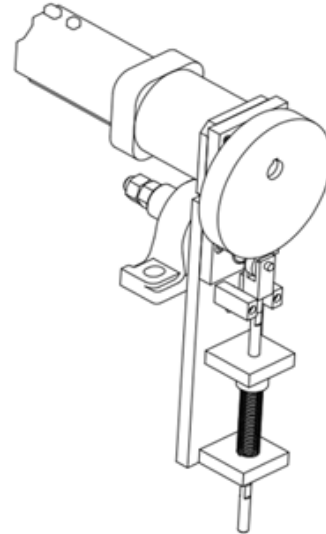
Hình 1. Hình dạng của nhôm định hình



Hình 2. Khung máy

b. Cơ cấu truyền động

Ở đây, ta sẽ dùng cơ cấu tay quay – thanh truyền.



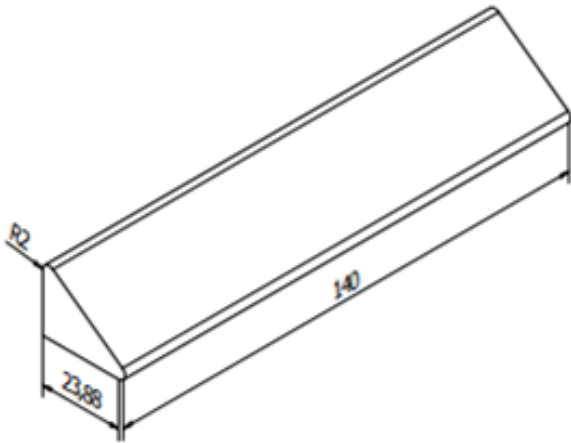
Hình 3. Cơ cấu quay

c. Thiết kế dao chấn

Dao chấn là một trong những bộ phận quan trọng nhất trong hệ thống máy chấn, trực tiếp quyết định đến hình dạng, độ chính xác và chất lượng của sản phẩm sau khi gia công. Trong thiết kế này, dao chấn được lựa chọn là dạng chữ V – một loại dao phổ biến và hiệu quả cao trong các quá trình chấn kim loại tấm, đặc biệt là khi cần tạo ra các góc gấp đều và chính xác.

Dao chấn dạng chữ V có ưu điểm là khả năng phân bố lực đồng đều lên vật liệu, giúp giảm nguy cơ biến dạng không mong muốn và đảm bảo bề mặt sản phẩm sau khi chấn đạt được độ mịn và độ chính xác cao. Với biên dạng này, góc V sẽ quyết định đến góc chấn của sản phẩm, do đó cần được thiết kế phù hợp với yêu cầu kỹ thuật cụ thể của chi tiết cần tạo hình.





Hình 4. Dao chẵn

Chiều dài dao được lựa chọn là 140 mm, lớn hơn nhiều so với chiều dài chẵn tối đa là 22 mm. Việc sử dụng dao có chiều dài lớn hơn không chỉ giúp đảm bảo tính ổn định và độ cứng vững trong suốt quá trình chẵn mà còn tạo điều kiện thuận lợi nếu có nhu cầu mở rộng phạm vi làm việc của máy trong tương lai.

Dao chẵn sẽ được chế tạo từ vật liệu có độ cứng cao, chẳng hạn như thép công cụ (tool steel) đã qua xử lý nhiệt, nhằm đảm bảo khả năng chịu lực tốt và tuổi thọ sử dụng lâu dài. Bề mặt dao cũng cần được gia công chính xác và có thể được phủ lớp chống mài mòn để tăng khả năng làm việc với các vật liệu có độ cứng cao hơn, đồng thời hạn chế hiện tượng dính vật liệu khi làm việc với nhôm.

Tóm lại, việc lựa chọn và thiết kế dao chẵn dạng chữ V với chiều dài 140 mm là phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của máy, đảm bảo khả năng tạo hình ổn định, chính xác và đáp ứng tốt các tiêu chí về độ bền và hiệu suất làm việc.



Hình 5. Chỉnh dao chẵn

3.3. Thiết kế hệ thống điều khiển

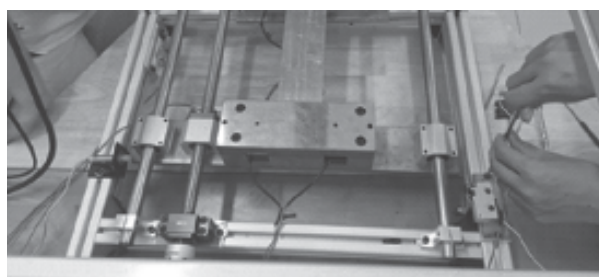
Hệ thống điều khiển của máy chẵn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ chính xác, an toàn và hiệu quả trong quá trình vận hành. Để đạt được điều này, hệ thống được thiết kế tích hợp các cảm biến hiện đại, bao gồm cảm biến hành trình và cảm biến lực.

Cảm biến hành trình được sử dụng để theo dõi vị trí tức thời của bàn chẵn hoặc dao chẵn trong suốt chu kỳ hoạt động. Thông qua tín hiệu từ cảm biến này, bộ điều khiển có thể xác định chính xác điểm bắt đầu, điểm dừng và hành trình di chuyển của cơ cấu chẵn, từ đó giúp đảm bảo độ chính xác cao về kích thước và hình dạng sản phẩm sau khi chẵn. Ngoài ra, cảm biến hành trình còn hỗ trợ trong việc thiết lập các giới hạn an toàn và điều chỉnh tốc độ chuyển động trong các giai đoạn khác nhau của quá trình chẵn.

Cảm biến lực được sử dụng để đo lực tác động thực tế trong quá trình chẵn. Việc giám

sát liên tục lực chấn giúp đảm bảo rằng lực tác dụng không vượt quá giới hạn cho phép, tránh gây hư hại cho vật liệu hoặc dao chấn. Đồng thời, dữ liệu từ cảm biến lực cũng cho phép hệ thống điều khiển phản hồi nhanh chóng trong trường hợp có sự bất thường xảy ra, từ đó nâng cao độ an toàn và độ tin cậy trong quá trình vận hành.

Sự kết hợp giữa hai loại cảm biến này giúp hệ thống điều khiển có khả năng tự động hóa cao, dễ dàng hiệu chỉnh, giám sát và đảm bảo chất lượng sản phẩm sau mỗi chu kỳ chấn. Hơn nữa, hệ thống có thể được kết nối với màn hình điều khiển hoặc phần mềm giao diện để người vận hành có thể theo dõi và điều chỉnh các thông số kỹ thuật một cách trực quan và chính xác.



Hình 6. Lắp hệ thống điều khiển

4. KẾT LUẬN

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành thiết kế, mô hình hóa và mô phỏng thành công một hệ thống máy chấn có khả năng tạo hình mặt cong kim loại tấm sử dụng cơ cấu tay quay – thanh truyền, với sự hỗ trợ từ phần mềm Autodesk Inventor. Các kết quả thu được từ mô phỏng động học đã chứng minh rằng cơ cấu đơn giản này có thể thực hiện quá trình chấn theo từng bước, tạo ra mặt cong với độ chính xác chấp nhận được, phù hợp với yêu cầu trong sản xuất quy mô nhỏ và vừa.

(*) 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: Phan Hữu Hoàng Ninh, Nguyễn Trọng Hiếu, Trần Quốc Hùng, 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: SV2025-344. ♦

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Altmeyer, G., Abed-Meraim, F., & Balan, T. (2009), “*Formability prediction of thin metal sheets using various localization criteria*”. International Journal of Material Forming, 2, 423-426. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0450-5>
- [2]. Bagherzadeh, S., Mirnia, M. J., & Mollaei Dariani, B. (2015), “*Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets*”. Journal of Manufacturing Processes, 18, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.03.001>
- [3]. Björklund, O., Govik, A., & Nilsson, L. (2014), “*Prediction of fracture in a dual-phase steel subjected to non-linear straining*”. Journal of Materials Processing Technology, 214, 2748-2758. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.011>
- [4]. Chu, X., Leotoing, L., Guines, D., & Ragneau, 

- E. (2014), “*Temperature and strain rate influence on AA5086 forming limit curves: Experimental results and discussion on the validity of the M-K model*”. International Journal of Mechanical Sciences, 78, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.11.015>
- [5]. Djavanroodi, F., & Derogar, A. (2010), “*Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets*”. Materials & Design, 31, 4866-4875. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.033>
- [6]. Hashemi, R., & Karajibani, E. (2016), “*Forming limit diagram of Al-Cu two-layer metallic sheets considering the Marciniak and Kuczynski theory*”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. <https://doi.org/10.1177/0954405416654419>
- [7]. Hussein, T., Umar, M., Qayyum, F., Guk, S., & Prah, U. (2022), “*Micromechanical effect of martensite attributes on forming limits of dual-phase steels investigated by crystal plasticity-based numerical simulations*”. Crystals, 12(2), 155. <https://doi.org/10.3390/cryst12020155>
- [8]. Hu, Q., Zhang, F., Li, X., & Chen, J. (2018), “*Overview on the prediction models for sheet metal forming failure: Necking and ductile fracture*”. Acta Mechanica Solida Sinica, 31, 259-289. <https://doi.org/10.1007/s10338-018-0095-3>
- [9]. ISO 12004-2:2008. (2008), “*Metallic materials – Sheet and strip – Determination of forming-limit curves – Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory*”. <https://www.iso.org/standard/43621.html>
- [10]. Karajibani, E., Hashemi, R., & Sedighi, M. (2016), “*Experimental determination of forming limit diagram in aluminum-copper two-layer metallic sheets (in Persian)*”. Journal of Science and Technology of Composites, 2(4), 45-50.
- [11]. Min, J., Lin, J., & Carter, J. T. (2013), “*Analytical method for forming limit diagram prediction with application to a magnesium ZEK100-O alloy*”. Journal of Materials Engineering and Performance, 22, 3324-3336. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0700-4>
- [12]. Peixinho, N., Jones, N., & Pinho, A. (2005), “*Application of dual-phase and TRIP steels on the improvement of crashworthy structures*”. Materials Science Forum, 502, 181-188.
- [13]. Sattarpanah Karganroudi, S., Shojaei, S., Hashemi, R., Rahmatabadi, D., Jamalian, S., Aminzadeh, A., & Ibrahim, H. (2021), “*Insight into the influence of punch velocity and thickness on forming limit diagrams of AA 6061 sheets – Numerical and experimental analyses*”. Metals, 11, 2010. <https://doi.org/10.3390/met11122010>
- [14]. Tekkaya, A. E., Bouchard, P.-O., Bruschi, S., & Tasan, C. C. (2020), “*Damage in metal forming*”. CIRP Annals, 69, 600-623. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.009>

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CÁC MẪU THỬ ĐỘ BỀN UỐN DẠNG TẤM BẰNG PHƯƠNG PHÁP IN 3D KIM LOẠI KHÔNG BÙ VẬT LIỆU

RESEARCH ON THE FABRICATION OF PLATE-SHAPED BENDING STRENGTH TEST SAMPLES USING NON-COMPENSATIVE METAL 3D PRINTING

Lê Đình Nguyên Huy, Phan Thanh Nhân, Lê Thanh Tùng, Nguyễn Hà*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21143030@student.hcmute.edu.vn; nhanpt@hcmute.edu.vn;

tunglt@hcmute.edu.vn; *haspkt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc chế tạo các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm bằng phương pháp in 3D kim loại không bù vật liệu, một kỹ thuật tiên tiến cho phép sản xuất các chi tiết kim loại phức tạp mà không cần gia công bổ sung sau in. Mục tiêu chính là đánh giá tác động của các thông số quy trình in 3D đến đặc tính cơ học, đặc biệt là độ bền uốn của vật liệu. Các mẫu thử được thiết kế theo tiêu chuẩn công nghiệp, chế tạo bằng công nghệ in 3D phù hợp, và kiểm tra cơ lý tính thông qua phương pháp uốn ba điểm. Kết quả thí nghiệm cho thấy mối tương quan rõ rệt giữa các thông số in, bao gồm hướng lớp, tốc độ in, nhiệt độ, và khả năng chịu uốn của sản phẩm. Dựa trên phân tích dữ liệu, nghiên cứu đề xuất các giải pháp tối ưu hóa quy trình in nhằm nâng cao chất lượng, độ bền cơ học và tính ổn định của sản phẩm. Những phát hiện này đóng góp quan trọng vào việc hoàn thiện công nghệ in 3D kim loại, thúc đẩy ứng dụng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và hiệu suất cao.

Từ khóa: In 3D kim loại; Không bù vật liệu; Mẫu thử độ bền uốn; Dạng tấm; Cơ tính vật liệu; Thông số in (hướng lớp, tốc độ in, nhiệt độ...); Kiểm tra uốn ba điểm.

ABSTRACT

This study focuses on the fabrication and evaluation of bending strength test specimens in the form of plates using non-compensated material metal 3D printing, an advanced technique enabling the production of complex metal components without requiring additional post-printing machining. The primary objective is to assess the impact of 3D printing process parameters on the mechanical properties, particularly the bending strength of the material. Test specimens were designed according to industry standards, fabricated using appropriate 3D printing technology, and subjected to mechanical property testing through the three-point bending method. Experimental results reveal a clear correlation between printing parameters, such as layer orientation, printing speed, and temperature, and the material's bending resistance. Based on the data analysis, the study proposes solutions to optimize the printing process to enhance the quality, mechanical strength, and stability of the products. These findings significantly contribute to refining metal 3D printing technology, promoting its application in industries requiring high precision and performance.

Keywords: Metal 3D printing; Non-compensated material; Bending strength test specimens; Flat/plate-shaped samples; Mechanical properties of materials; Printing parameters (layer orientation, printing speed, temperature, etc.); Three-point bending test.



1. TỔNG QUAN

Công nghệ in 3D kim loại đã và đang trở thành một bước tiến quan trọng trong lĩnh vực sản xuất hiện đại, đặc biệt trong các ngành công nghiệp kỹ thuật cao như hàng không vũ trụ, ô tô, y tế và năng lượng [1]. So với các phương pháp gia công truyền thống như đúc, phay, tiện hoặc rèn, in 3D kim loại mang lại nhiều ưu điểm vượt trội, bao gồm khả năng chế tạo các chi tiết phức tạp, giảm thiểu lãng phí vật liệu và rút ngắn thời gian sản xuất [2]. Đặc biệt, công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu, chẳng hạn như các phương pháp dựa trên công nghệ Laser Powder Bed Fusion (LPBF) hoặc Directed Energy Deposition (DED), đã mở ra tiềm năng lớn trong việc tối ưu hóa quy trình sản xuất, giảm chi phí và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên [3]. Trong bối cảnh đó, nghiên cứu chế tạo các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm bằng công nghệ này đang thu hút sự chú ý của giới khoa học và công nghiệp, mặc dù vẫn còn nhiều thách thức cần được giải quyết.

Công nghệ in 3D kim loại là một dạng của sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing - AM), trong đó vật liệu kim loại được chế tạo từng lớp theo thiết kế số hóa [4]. Các phương pháp phổ biến bao gồm LPBF, DED và Binder Jetting, trong đó LPBF được sử dụng rộng rãi nhất nhờ khả năng tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao và bề mặt hoàn thiện tốt [5]. Công nghệ này cho phép sản xuất các chi tiết với hình học phức tạp mà không cần khuôn mẫu, từ đó giảm chi phí và thời gian trong các giai đoạn thiết kế và sản xuất [6]. Hơn nữa, in 3D kim loại còn cho phép tích hợp các chức năng trong một chi tiết duy nhất, giảm số lượng linh kiện cần lắp ráp và cải thiện hiệu suất cơ học [7].

Trong các ứng dụng kỹ thuật, độ bền cơ học của các sản phẩm in 3D kim loại là một yếu

tổ quan trọng cần được đánh giá kỹ lưỡng. Các nghiên cứu gần đây cho thấy, các chi tiết được chế tạo bằng in 3D kim loại có thể đạt được các đặc tính cơ học tương đương hoặc thậm chí vượt trội so với các chi tiết được sản xuất bằng phương pháp truyền thống, nếu các thông số công nghệ được tối ưu hóa [8]. Tuy nhiên, các đặc điểm vi cấu trúc, như độ xốp, ứng suất dư và sự phân bố không đồng đều của vật liệu, có thể ảnh hưởng tiêu cực đến chất lượng sản phẩm và cần được kiểm soát chặt chẽ [9].

(*) Công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu

Công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu, hay còn gọi là in 3D không sử dụng vật liệu bổ sung (non-material addition), là một hướng đi mới nhằm giảm thiểu lượng vật liệu sử dụng trong quá trình sản xuất. Thay vì sử dụng vật liệu bổ sung như trong các phương pháp truyền thống (ví dụ: vật liệu bù trong đúc hoặc gia công cắt gọt), công nghệ này tập trung vào việc sử dụng chính xác lượng vật liệu cần thiết để xây dựng chi tiết, từ đó giảm thiểu lãng phí và chi phí [10]. Các kỹ thuật như LPBF và DED thường được áp dụng trong phương pháp này, trong đó bột kim loại hoặc dây kim loại được nung chảy bằng nguồn năng lượng cao (thường là laser hoặc chùm electron) và bồi đắp từng lớp để tạo thành sản phẩm [11].

Một trong những ưu điểm lớn của công nghệ in 3D không bù vật liệu là khả năng tối ưu hóa thiết kế, cho phép tạo ra các cấu trúc rỗng hoặc lưới (lattice structures) có trọng lượng nhẹ nhưng vẫn đảm bảo độ bền cơ học [12]. Ngoài ra, công nghệ này còn giúp rút ngắn chuỗi cung ứng, giảm sự phụ thuộc vào các quy trình sản xuất phức tạp và tăng tính linh hoạt trong sản xuất các lô hàng nhỏ hoặc sản phẩm tùy chỉnh [13]. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất của phương pháp này nằm ở việc đảm bảo chất lượng bề

mặt, độ chính xác kích thước và các đặc tính cơ học của sản phẩm, đặc biệt khi áp dụng vào các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm [14].

(*) Ứng dụng trong chế tạo mẫu thử độ bền uốn dạng tấm

Mẫu thử độ bền uốn dạng tấm là một loại mẫu thử quan trọng trong việc đánh giá các đặc tính cơ học của vật liệu, đặc biệt trong các ngành công nghiệp yêu cầu cao về độ bền và độ dẻo dai, như hàng không vũ trụ và ô tô [1]. Trong các phương pháp truyền thống, các mẫu thử này thường được chế tạo bằng cách gia công cơ khí hoặc đúc, đòi hỏi nhiều công đoạn và tiêu tốn vật liệu [2]. Việc ứng dụng công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu để chế tạo các mẫu thử dạng tấm mang lại nhiều lợi ích tiềm năng, bao gồm giảm chi phí, rút ngắn thời gian sản xuất và khả năng tùy chỉnh thiết kế mẫu thử [3].

Tuy nhiên, việc áp dụng công nghệ in 3D kim loại vào chế tạo mẫu thử độ bền uốn dạng tấm vẫn còn nhiều hạn chế. Các nghiên cứu chỉ ra rằng, các mẫu thử in 3D có thể xuất hiện các khuyết tật vi cấu trúc, như độ xốp hoặc ứng suất dư, làm giảm độ bền uốn so với các mẫu được gia công truyền thống [4]. Để khắc phục, cần tối ưu hóa các thông số in, bao gồm công suất laser, tốc độ quét, độ dày lớp và chiến lược quét [5]. Ngoài ra, việc kiểm soát nhiệt độ và môi trường in cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm [6].

(*) So sánh với phương pháp truyền thống

So với các phương pháp truyền thống như đúc hoặc gia công cơ khí, in 3D kim loại không bù vật liệu mang lại nhiều ưu điểm về hiệu quả kinh tế và tính linh hoạt. Các phương pháp truyền thống thường yêu cầu khuôn mẫu,

công cụ cắt gọt và nhiều công đoạn gia công bổ sung, dẫn đến chi phí cao và thời gian sản xuất kéo dài [7]. Trong khi đó, in 3D kim loại cho phép sản xuất trực tiếp từ mô hình số, loại bỏ nhu cầu về khuôn mẫu và giảm thiểu lãng phí vật liệu [8]. Tuy nhiên, chất lượng cơ học của các mẫu thử in 3D vẫn cần được so sánh kỹ lưỡng với các mẫu thử truyền thống để đảm bảo tính tương thích trong các ứng dụng thực tế [9].

Các nghiên cứu gần đây cho thấy, trong một số trường hợp, các mẫu thử độ bền uốn in 3D có thể đạt được độ bền tương đương với các mẫu gia công cơ khí, nhưng độ dẻo và khả năng chịu tải động có thể bị hạn chế do các khuyết tật vi cấu trúc [10]. Do đó, việc cải thiện quy trình in 3D và phát triển các phương pháp hậu xử lý, như xử lý nhiệt hoặc gia công bề mặt, là cần thiết để nâng cao chất lượng sản phẩm [11].

(*) Thách thức và định hướng nghiên cứu

Mặc dù công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu mang lại nhiều lợi ích, nhưng vẫn tồn tại một số thách thức cần được giải quyết. Thứ nhất, việc kiểm soát vi cấu trúc và khuyết tật trong quá trình in là một vấn đề phức tạp, đòi hỏi các nghiên cứu sâu hơn về tối ưu hóa thông số công nghệ [12]. Thứ hai, chi phí đầu tư ban đầu cho các hệ thống in 3D kim loại vẫn còn cao, hạn chế khả năng áp dụng rộng rãi trong các doanh nghiệp vừa và nhỏ [13]. Thứ ba, việc thiếu các tiêu chuẩn hóa trong sản xuất và kiểm tra chất lượng sản phẩm in 3D cũng là một rào cản lớn [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Nguyên lý hoạt động của in 3D kim loại bằng phương pháp hàn TIG dựa trên việc sử dụng hồ quang điện giữa điện cực không nóng chảy và bề mặt vật liệu nền, dưới môi trường 

khí trơ (thường là Argon) để nung chảy bên trong thanh kim loại, từ đó vật liệu lên nhau theo biên dạng định sẵn. Quá trình này thường được điều khiển bằng cánh tay robot hoặc hệ thống CNC nhằm đảm bảo độ chính xác và ổn định của đường hàn. So với các phương pháp in 3D kim loại sử dụng laser, in 3D bằng hàn TIG có ưu điểm là chi phí đầu tư thấp, sử dụng vật liệu hàn phổ biến, và tốc độ nóng chảy và liên kết cao, đặc biệt phù hợp với các chi tiết kích thước lớn và hình học đơn giản. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn tồn tại những hạn chế như độ chính xác hình học chưa cao, bề mặt thô, dễ phát sinh ứng suất dư và biến dạng nhiệt. Các thông số công nghệ như dòng hàn, tốc độ cấp dây, tốc độ di chuyển đầu hàn và loại khí bảo vệ có ảnh hưởng lớn đến chất lượng lớp đắp, đòi hỏi phải được tối ưu hóa phù hợp với từng loại vật liệu và mục đích sử dụng.

3. CÁC BƯỚC THỰC NGHIỆM

Bước 1. Chuẩn bị thiết bị và vật liệu

- Chuẩn bị các phôi theo kích thước tiêu chuẩn: $255 \times 4 \times 4$; $255 \times 5 \times 5$; ... đến $255 \times 8 \times 8$ mm.
- Làm sạch bề mặt tiếp xúc của phôi để tránh nhiễm bẩn ảnh hưởng đến quá trình hàn.
- Chuẩn bị máy hàn WAAM 3 trục, nguồn điện, hệ thống khí bảo vệ (Argon), dây tiếp mát (mass), và đầu hàn TIG.

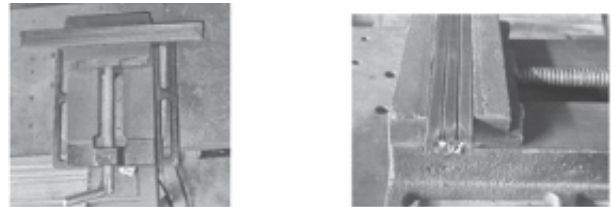


Hình 1. Chuẩn bị thiết bị và vật liệu

Bước 2. Cố định và gá phôi

– Gá phôi lên ê-tô để cố định chắc chắn, đảm bảo không dịch chuyển trong quá trình hàn.

– Hàn chấp nhẹ hai đầu phôi để giữ ổn định vị trí ban đầu.



Hình 2. Cố định và gá phôi

Bước 3. Lập trình và nhập thông số cho máy WAAM

- Gá đầu hàn TIG lên hệ thống đầu chuyển động.
- Nhập mã lệnh điều khiển (G-code) và thông số hàn từ bảng thiết kế Taguchi vào chế độ tự động (Auto Mode) của máy WAAM.
- Các thông số bao gồm: Dòng điện (A), tốc độ di chuyển súng hàn (F), khoảng hở đầu hàn (Denta), và bề dày phôi cần hàn (t).

Bước 4. Căn chỉnh tọa độ và chạy code

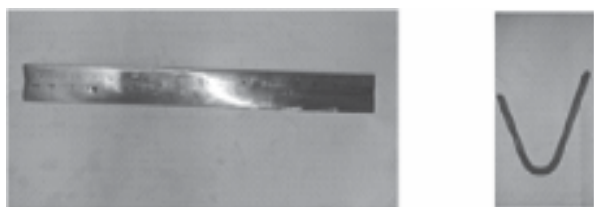
- Đặt tọa độ gốc cho máy trong chế độ thủ công (Manual Mode).
- Kẹp mass vào vị trí thích hợp để đảm bảo mạch điện kín.
- Khởi động quá trình hàn tự động theo chương trình đã cài đặt.



Hình 3. Căn chỉnh tọa độ và chạy code

Bước 5. Sau khi hàn – xử lý mẫu

- Mẫu được đem đi gia công đánh bóng bề mặt để loại bỏ lớp oxi hóa và khuyết tật bề mặt.
- Sau đó, mẫu được đưa đi kiểm tra cơ tính qua thử nghiệm uốn.



Hình 4. Sau khi hàn – xử lý mẫu

Bước 6. Ghi nhận dữ liệu và xử lý số liệu

- Ghi lại kết quả uốn, độ cong, vị trí nứt gãy (nếu có).
- Tiến hành phân tích ảnh hưởng của các thông số hàn lên độ bền uốn.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bảng 1 cung cấp dữ liệu thực nghiệm theo ma trận Taguchi L25 (5^4), nghĩa là ma trận này khảo sát 4 yếu tố (A, F, Δ , h) với mỗi yếu tố có 5 mức giá trị khác nhau, dẫn đến 25 tổ hợp thí nghiệm. Các yếu tố và mức giá trị được liệt kê như sau:

- A (Dòng điện hàn, Ampe): 135, 140, 145, 150, 155.
- F (Tốc độ dịch chuyển đầu hàn, mm/s hoặc mm/min): 13.50, 15.75, 18.00, 20.25, 22.50.
- Δ (Khoảng cách đầu hàn với bề mặt, mm): 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00.
- h (Bề dày phôi cần hàn, mm): 4, 5, 6, 7, 8.

Mỗi hàng trong bảng đại diện cho một tổ hợp thông số được thử nghiệm, và các tổ hợp

này được thiết kế theo ma trận trực giao L25 để đảm bảo rằng các yếu tố được khảo sát một cách cân bằng, giảm thiểu số lượng thí nghiệm mà vẫn thu thập được thông tin đầy đủ về ảnh hưởng của các yếu tố đến kết quả đầu ra (độ bền uốn).

Ý nghĩa của các yếu tố:

- Dòng điện hàn (A): Ảnh hưởng trực tiếp đến năng lượng cung cấp cho quá trình hàn, từ đó tác động đến nhiệt độ, độ nóng chảy của vật liệu, và chất lượng mối hàn.
- Tốc độ dịch chuyển đầu hàn (F): Quyết định thời gian tương tác giữa nguồn nhiệt và vật liệu, ảnh hưởng đến độ đồng đều của lớp vật liệu bồi đắp và hình dạng phôi.
- Khoảng cách đầu hàn (Δ): Liên quan đến độ ổn định của hồ quang hàn và sự phân bố nhiệt, có thể gây ra các khuyết tật nếu không được điều chỉnh phù hợp.
- Bề dày phôi (h): Ảnh hưởng đến khả năng chịu tải và độ bền uốn của mẫu thử, đồng thời tác động đến chiến lược in (số lớp bồi đắp, thời gian in).

(*) Phương pháp Taguchi và vai trò trong nghiên cứu

Phương pháp Taguchi là một công cụ thống kê mạnh mẽ, được sử dụng để tối ưu hóa các quy trình kỹ thuật bằng cách xác định tổ hợp thông số tốt nhất với số lượng thí nghiệm tối thiểu. Trong nghiên cứu này, phương pháp Taguchi được áp dụng thông qua ma trận trực giao L25, cho phép khảo sát đồng thời 4 yếu tố ở 5 mức giá trị mà chỉ cần thực hiện 25 thí nghiệm thay vì 625 (5^4) thí nghiệm nếu sử dụng phương pháp toàn diện (full factorial design).

Các đặc điểm chính của phương pháp Taguchi:



- Ma trận trực giao: Đảm bảo rằng mỗi mức của một yếu tố được kết hợp đều đặn với các mức của các yếu tố khác, giúp phân tích độc lập ảnh hưởng của từng yếu tố.

- Tối ưu hóa và giảm nhiễu: Phương pháp Taguchi không chỉ tìm tổ hợp thông số tối ưu mà còn giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu (như biến động nhiệt độ môi trường, độ ẩm, hoặc sai lệch thiết bị).

- Hiệu quả kinh tế: Giảm số lượng thí nghiệm, từ đó tiết kiệm thời gian, chi phí vật liệu, và nguồn lực.

Trong nghiên cứu, mục tiêu chính là tối ưu hóa độ bền uốn của các mẫu thử dạng tấm. Điều này đòi hỏi phân tích dữ liệu từ các thí nghiệm để xác định yếu tố nào (A, F, Δ , h) có ảnh hưởng lớn nhất và mức giá trị nào của các yếu tố này mang lại kết quả tốt nhất.

Bảng 1. Bảng thông số Taguchi kết quả của quá trình thực nghiệm

STT	A	F	Δ	h
1	135	13.50	1.00	4
2	135	15.75	1.25	5
3	135	18.00	1.50	6
4	135	20.25	1.75	7
5	135	22.50	2.00	8
6	140	13.50	1.25	6
7	140	15.75	1.50	7
8	140	18.00	1.75	8
9	140	20.25	2.00	4
10	140	22.50	1.00	5
11	145	13.50	1.50	8
12	145	15.75	1.75	4
13	145	18.00	2.00	5
14	145	20.25	1.00	6
15	145	22.50	1.25	7
16	150	13.50	1.75	5
17	150	15.75	2.00	6

18	150	18.00	1.00	7
19	150	20.25	1.25	8
20	150	22.50	1.75	4
21	155	13.50	2.00	7
22	155	15.75	1.00	8
23	155	18.00	1.25	4
24	155	20.25	1.50	5
25	155	22.50	1.75	6

(*) Phân tích dữ liệu từ bảng thông số

Dựa trên Bảng 1, có thể thực hiện phân tích sơ bộ về sự phân bố các yếu tố và mức giá trị:

(*) Phân bố các mức giá trị

Mỗi yếu tố (A, F, Δ , h) xuất hiện ở mỗi mức giá trị 5 lần trong 25 thí nghiệm, điều này phù hợp với tính chất cân bằng của ma trận L25. Ví dụ:

- Dòng điện hàn (A) = 135 Ampe xuất hiện ở các thí nghiệm 1, 2, 3, 4, 5.

- Tốc độ dịch chuyển (F) = 13.50 mm/s xuất hiện ở các thí nghiệm 1, 6, 11, 16, 21.

Sự phân bố này đảm bảo rằng ảnh hưởng của từng yếu tố được đánh giá công bằng, không bị thiên lệch bởi các yếu tố khác.

(*) Xu hướng của các yếu tố

Mặc dù bảng không cung cấp kết quả độ bền uốn cụ thể, ta có thể suy ra một số xu hướng dựa trên các yếu tố và giá trị:

- Dòng điện hàn (A): Các mức cao hơn (150, 155 Ampe) có thể cung cấp năng lượng lớn hơn, dẫn đến mối hàn chắc hơn, nhưng cũng có nguy cơ gây quá nhiệt hoặc khuyết tật nếu không được kiểm soát.

- Tốc độ dịch chuyển (F): Tốc độ cao (20.25, 22.50 mm/s) có thể làm giảm thời gian tương tác nhiệt, dẫn đến lớp bồi đắp mỏng hơn hoặc không đồng đều, trong khi tốc độ thấp (13.50, 15.75 mm/s) có thể cải thiện độ đồng đều nhưng kéo dài thời gian in.

- Khoảng cách đầu hàn (Δ): Khoảng cách nhỏ (1.00, 1.25 mm) có thể tăng độ chính xác của hồ quang, nhưng quá nhỏ có thể gây ra hiện tượng bắn tóe hoặc cháy vật liệu. Khoảng cách lớn (1.75, 2.00 mm) có thể làm giảm độ ổn định của hồ quang.

- Bề dày phôi (h): Phôi dày hơn (7, 8 mm) có thể tăng độ bền uốn do khối lượng vật liệu lớn hơn, nhưng yêu cầu năng lượng và thời gian in lớn hơn.

(*) Phân tích tương tác

Phương pháp Taguchi cũng cho phép phân tích tương tác giữa các yếu tố (ví dụ: A và F, hoặc F và Δ). Tuy nhiên, với ma trận L25, tương tác thường không được đánh giá chi tiết trừ khi có thiết kế bổ sung. Trong trường hợp này, cần sử dụng các công cụ thống kê (như ANOVA - Analysis of Variance) để xác định yếu tố nào có ảnh hưởng thống kê đáng kể đến độ bền uốn.

(*) Ý nghĩa khoa học và ứng dụng thực tiễn

Nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng trong lĩnh vực in 3D kim loại, đặc biệt với công nghệ WAAM sử dụng hàn TIG không dây bù vật liệu:

(+) Đóng góp khoa học:

- Tối ưu hóa quy trình: Việc áp dụng phương pháp Taguchi giúp xác định tổ hợp thông số tối ưu, từ đó cải thiện chất lượng mẫu thử độ bền uốn (độ bền, hình học ổn định, ít

khuyết tật).

- Hiểu biết về yếu tố ảnh hưởng: Kết quả nghiên cứu sẽ làm rõ vai trò của từng yếu tố (A, F, Δ , h) và mức độ ảnh hưởng của chúng đến chất lượng sản phẩm in 3D.

- Tiết kiệm tài nguyên: Sử dụng ma trận Taguchi giảm đáng kể số lượng thí nghiệm, phù hợp với các nghiên cứu có chi phí cao như in 3D kim loại.

(+) Ứng dụng thực tiễn:

- Sản xuất công nghiệp: Kết quả nghiên cứu có thể được áp dụng để sản xuất các chi tiết dạng tấm trong các ngành như hàng không vũ trụ, ô tô, hoặc năng lượng, nơi yêu cầu cao về độ bền uốn.

- Giảm chi phí: Công nghệ WAAM không dây bù vật liệu kết hợp với thông số tối ưu giúp giảm lãng phí vật liệu và thời gian sản xuất.

- Tùy chỉnh sản phẩm: Khả năng điều chỉnh thông số theo phương pháp Taguchi cho phép sản xuất các mẫu thử hoặc sản phẩm tùy chỉnh với đặc tính cơ học mong muốn.

Trong nghiên cứu này, phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi được áp dụng để tối ưu hóa các thông số đầu vào của quá trình in 3D kim loại sử dụng máy WAAM 3 trục với công nghệ hàn TIG không dây bù vật liệu.

Phương pháp Taguchi là một kỹ thuật thiết kế thí nghiệm do giáo sư Genichi Taguchi phát triển nhằm tìm ra tổ hợp thông số tối ưu cho một quá trình kỹ thuật, đồng thời giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu (noise) từ môi trường bên ngoài. Thông qua việc sử dụng ma trận trực giao (Orthogonal Array – OA), phương pháp này cho phép thực hiện số lượng thí nghiệm tối thiểu nhưng vẫn đảm bảo độ tin cậy cao trong phân tích.



Trong quá trình in 3D tấm hợp kim bằng máy WAAM 3 trục, các yếu tố đầu vào như: dòng điện hàn (A), tốc độ dịch chuyển đầu hàn (F), khoảng cách đầu hàn với bề mặt (Δ), và bề dày phôi cần hàn (t) được xem là các yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt, độ bền cơ học, và hình dạng cuối cùng của vật in.

Để tránh việc thử tất cả các tổ hợp thông số (gây tốn kém thời gian và vật liệu), ma trận Taguchi được lựa chọn nhằm tổ chức các thí nghiệm có tính đại diện. Mỗi tổ hợp thông số được đưa vào chế độ Auto của máy WAAM và kiểm nghiệm thông qua thử nghiệm uốn sau khi in xong.

Trong khuôn khổ nghiên cứu, nhóm thực hiện đã xây dựng một ma trận thí nghiệm theo phương pháp Taguchi L25 (5^4) nhằm khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến độ bền uốn của sản phẩm in 3D kim loại dạng tấm sử dụng máy WAAM 3 trục – hàn TIG không dây.

Mục tiêu chính là xác định tổ hợp thông số tối ưu gồm:

- A – Dòng điện hàn (Ampe);
- F – Tốc độ dịch chuyển đầu hàn (mm/s hoặc mm/min);
- Δ – Khoảng hở đầu hàn (mm);
- h – Bề dày phôi cần hàn $\rightarrow$ nhằm tạo ra mẫu vật có độ bền uốn cao nhất, hình học ổn định, ít khuyết tật.

5. KẾT LUẬN

Đề tài “Nghiên cứu chế tạo các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm bằng phương pháp in 3D kim loại không bù vật liệu” đã tiến hành xây dựng quy trình thực nghiệm dựa trên công nghệ

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) sử dụng hàn TIG không dây, kết hợp với phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi. Thông qua việc triển khai 25 tổ hợp thí nghiệm L25 (5^4) với các biến đầu vào bao gồm dòng điện hàn, tốc độ dịch chuyển, khoảng hở đầu súng hàn và bề dày mẫu, nhóm nghiên cứu đã: Hoàn thiện quy trình in tấm thử dạng phẳng ổn định. Phát hiện và xử lý các lỗi phổ biến trong quá trình WAAM như biến dạng phôi, rỗ khí và sai lệch lớp in. Thiết lập được nền tảng dữ liệu cho giai đoạn đo đạc và phân tích cơ tính. Mặc dù dữ liệu từ phép thử uốn ba điểm (Three-Point Bending Test) chưa được thực hiện do điều kiện thiết bị chưa hoàn tất, quá trình thực nghiệm và thiết kế thông số đã tuân thủ đúng nguyên tắc tối ưu hóa, đảm bảo khả năng tái lập và so sánh kết quả trong giai đoạn phân tích tiếp theo. Từ các nghiên cứu tương tự trên thế giới, đặc biệt là công trình của Cheng et al. (2023) về tối ưu hóa thông số WAAM bằng Taguchi-GRA, có thể dự đoán rằng: Tốc độ dịch chuyển đầu hàn và khoảng hở đầu hàn là những yếu tố có ảnh hưởng mạnh đến cơ tính. Mức dòng điện vừa phải (135-145A) có khả năng tạo ra đường hàn ổn định và ít rỗ khí hơn. Kết luận, đề tài đã thành công trong việc xây dựng nền móng thực nghiệm vững chắc để triển khai thử nghiệm uốn và phân tích cơ học trong giai đoạn tiếp theo.

(*) 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: Lê Đình Nguyên Huy, Phan Thanh Nhân, Lê Thanh Tùng, Nguyễn Hà.
- Tác giả liên hệ: Nguyễn Hà.

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: SV2025-355.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Aguirre, T. G., Fuller, L., Ingrole, A., Seek, T. W., Wheatley, B. B., Steineman, B. D., Haut Donahue, T. L., & Donahue, S. W. (2020), “Bioinspired material architectures from bighorn sheep horncore velar bone for impact loading applications”. Scientific Reports, 10, 18916. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76021-5>
- [2]. Boydston, A. (2020), “Andrew Boydston answers questions about additive manufacturing”. Nature Communications, 11, 3992. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17722-3>
- [3]. DebRoy, T., Mukherjee, T., Wei, H. L., & Elmer, J. W. (2021), “Metallurgy mechanistic models and machine learning in metal printing”. Nature Reviews Materials, 6, 48-68. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00236-1>
- [4]. Du, X., Dehghani, M., Alsaadi, N., Nejad, M. G., Saber-Samandari, S., Toghraie, D., Su, C.-H., & Nguyen, H. C. (2022), “A femoral shape porous scaffold bio-nanocomposite fabricated using 3D printing and freeze-drying technique for orthopedic application”. Materials Chemistry and Physics, 275, 125302. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125302>
- [5]. Ghanem, M. A., Basu, A., Behrou, R., Boechler, N., Boydston, A. J., Craig, S. L., Lin, Y., Lynde, B. E., Nelson, A., Shen, H., & Storti, D. W. (2021), “The role of polymer mechanochemistry in responsive materials and additive manufacturing”. Nature Reviews Materials, 6, 84-98. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00249-w>
- [6]. He, J., Zhu, S., Luo, C., Niu, X., & Wang, Q. (2022), “Size effect in fatigue modelling of defective materials: Application of the calibrated weakest-link theory”. International Journal of Fatigue, 165, 107213. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107213>
- [7]. Karimi, M., Asefnejad, A., Aflaki, D., Surendar, A., Baharifar, H., Saber-Samandari, S., Khandan, A., Khan, A., & Toghraie, D. (2021), “Fabrication of shapeless scaffolds reinforced with baghdadite-magnetite nanoparticles using a 3D printer and freeze-drying technique”. Journal of Materials Research and Technology, 14, 3070-3079. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.084>
- [8]. Khan, S. B., Irfan, S., Lam, S. S., Sun, X., & Chen, S. (2022), “3D printed nanofiltration membrane technology for waste water distillation”. Journal of Water Process Engineering, 49, 102958. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102958>
- [9]. Liao, D., Zhu, S., Keshtegar, B., Qian, G., & Wang, Q. (2020), “Probabilistic framework for fatigue life assessment of notched components under size effects”. International Journal of Mechanical Sciences, 181, 105685. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105685>
- [10]. Moarrefzadeh, A., Morovvati, M. R., Angili, S. N., Smaism, G. F., Khandan, A., & Toghraie, D. (2023), “Fabrication and finite element simulation of 3D printed poly L-lactic acid scaffolds coated with alginate/carbon nanotubes for bone engineering applications”. International Journal of Biological Macromolecules, 224, 1496-1508. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.238>
- [11]. Niu, X., Zhu, S., He, J., Liao, D., Correia, J. A. F. O., Berto, F., & Wang, Q. (2022), “Defect tolerant fatigue assessment of AM materials: Size effect and probabilistic prospects”. International Journal of Fatigue, 160, 106884. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106884>
- [12]. Ren, W., & Mazumder, J. (2020), “In-situ porosity recognition for laser additive manufacturing of 7075-Al alloy using plasma emission spectroscopy”. Scientific Reports, 10, 19493. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75131-4>
- [13]. Yang, J., Cheng, Y., Gong, X., Yi, S., Li, C.-W., Jiang, L., & Yi, C. (2022), “An integrative review on the applications of 3D printing in the field of in vitro diagnostics”. Chinese Chemical Letters, 33(5), 2231-2242. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2021.08.105>
- [14]. Zhang, A., Wang, F., Chen, L., Wei, X., Xue, M., Yang, F., & Jiang, S. (2021), “3D printing hydrogels for actuators: A review”. Chinese Chemical Letters, 32(10), 2923-2932. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2021.03.073>

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MẪU THỬ ĐỘ BỀN KÉO CỦA KẾT CẤU DẠNG LATTICE

DESIGN AND FABRICATION OF TENSILE STRENGTH TEST SPECIMENS FOR LATTICE STRUCTURES

Huỳnh Trần Minh Chiến, Âu Thị Kim Loan, Hoàng Trọng Nghĩa, Tạ Nguyễn Minh Đức*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 22144062@student.hcmute.edu.vn;

autkl@hcmute.edu.vn;

nghiaht@hcmute.edu.vn;

*ductnm@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực nghiên cứu vật liệu và cơ học ứng dụng, việc thiết kế và chế tạo mẫu thử độ bền kéo cho kết cấu dạng lattice đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá đặc tính cơ học của các cấu trúc nhẹ nhưng có độ bền cao. Kết cấu lattice, với đặc điểm hình học phức tạp và khả năng phân bố ứng suất hiệu quả, đang được ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp tiên tiến như hàng không, y sinh và sản xuất bồi đắp. Nghiên cứu này tập trung vào quá trình thiết kế tối ưu hình dạng và thông số cấu trúc của mẫu thử, kết hợp với công nghệ in 3D để chế tạo chính xác các chi tiết có hình học vi mô phức tạp. Thông qua việc thử nghiệm độ bền kéo và phân tích ứng xử cơ học, nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc lattice đến khả năng chịu lực, từ đó cung cấp cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế trong các ứng dụng thực tiễn.

Từ khóa: Kết cấu lattice; Mẫu thử độ bền kéo; Thiết kế mẫu kéo; Mô phỏng; In 3D lattice.

ABSTRACT

In the field of materials research and applied mechanics, the design and fabrication of tensile test specimens for lattice structures play a crucial role in evaluating the mechanical properties of lightweight yet high-strength configurations. Lattice structures, characterized by their complex geometries and effective stress distribution capabilities, are increasingly being applied in advanced industries such as aerospace, biomedical engineering, and additive manufacturing. This study focuses on the optimal design of geometry and structural parameters of test specimens, combined with 3D printing technology to precisely fabricate components with intricate microstructures. Through tensile testing and mechanical behavior analysis, the research aims to assess the influence of lattice structures on load-bearing capacity, thereby providing a foundation for structural optimization in practical applications.

Keywords: Lattice structure; Tensile test specimen; Tensile specimen design; Simulation; 3D printing of lattice structures.

1. TỔNG QUAN

Kết cấu dạng lattice, với đặc trưng là các mạng lưới vi mô lặp lại, đã trở thành một giải pháp tối ưu trong thiết kế các cấu trúc nhẹ, bền và tiết kiệm vật liệu, được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như hàng không vũ trụ, y sinh, và xây dựng [1, 2]. Việc thiết kế và chế tạo mẫu thử độ bền kéo cho các kết cấu này đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá khả năng chịu lực, ứng xử cơ học, và tiềm năng ứng dụng thực tiễn. Quá trình này không chỉ đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về cơ học vật liệu mà còn yêu cầu tích hợp các công nghệ tiên tiến như mô phỏng số, tối ưu hóa hình học, và in 3D để đảm bảo độ chính xác và tính đồng nhất của mẫu thử [3, 4]. Tổng quan này trình bày các khía cạnh chính liên quan đến thiết kế, chế tạo, và thử nghiệm độ bền kéo của kết cấu dạng lattice, đồng thời thảo luận các thách thức và hướng phát triển trong lĩnh vực này.

(*) Thiết kế kết cấu dạng lattice

Thiết kế kết cấu dạng lattice tập trung vào việc tối ưu hóa hình học để đạt được sự cân bằng giữa trọng lượng, độ bền, và khả năng hấp thụ năng lượng. Các cấu trúc lattice thường được xây dựng dựa trên các đơn vị ô (unit cells) lặp lại, chẳng hạn như BCC (body-centered cubic), FCC (face-centered cubic), hoặc các cấu trúc phức tạp hơn như gyroid [5]. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng việc thay đổi kích thước, hình dạng, và tỷ lệ rỗng của ô đơn vị có thể cải thiện đáng kể các đặc tính cơ học, bao gồm độ cứng và khả năng chịu tải [6]. Phần mềm mô phỏng số, chẳng hạn như ABAQUS hoặc ANSYS, được sử dụng rộng rãi để phân tích ứng xử cơ học của các cấu trúc này trước khi chế tạo, giúp dự đoán các điểm yếu tiềm tàng và tối ưu hóa thiết kế [7]. Ngoài ra, các thuật toán tối ưu hóa tô pô (topology

optimization) đã được áp dụng để tạo ra các cấu trúc lattice có hiệu suất cao, giảm thiểu lãng phí vật liệu mà vẫn đảm bảo yêu cầu kỹ thuật [8].

Một thách thức lớn trong thiết kế là đảm bảo tính đồng nhất của cấu trúc vi mô, đặc biệt khi các mẫu thử được chế tạo ở quy mô nhỏ. Sự sai lệch trong hình học, dù nhỏ, cũng có thể dẫn đến kết quả thử nghiệm không chính xác, làm giảm độ tin cậy của dữ liệu cơ tính [9]. Do đó, việc sử dụng các công cụ mô phỏng tiên tiến kết hợp với các phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT) trước khi thử nghiệm là cần thiết để đảm bảo chất lượng thiết kế [10].

(*) Công nghệ chế tạo mẫu thử

In 3D, đặc biệt là các kỹ thuật như Selective Laser Melting (SLM) và Stereolithography (SLA), đã cách mạng hóa việc chế tạo các kết cấu lattice với độ chính xác cao [3]. Các kỹ thuật này cho phép tái tạo các chi tiết vi mô phức tạp, từ các thanh nanomet đến các ô đơn vị có kích thước vài micromet, với độ phân giải vượt trội so với các phương pháp truyền thống. Vật liệu được sử dụng trong in 3D, chẳng hạn như hợp kim titan (Ti6Al4V), thép không gỉ, hoặc polymer cường độ cao, được lựa chọn dựa trên yêu cầu ứng dụng cụ thể [4]. Ví dụ, hợp kim titan thường được ưu tiên trong các ứng dụng y sinh nhờ tính tương thích sinh học và độ bền cao, trong khi polymer được sử dụng trong các ứng dụng yêu cầu trọng lượng nhẹ [5].

Quá trình chế tạo đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số in, bao gồm công suất laser, tốc độ quét, và độ dày lớp, để đảm bảo tính đồng nhất và giảm thiểu khuyết tật như lỗ rỗng hoặc biến dạng nhiệt [6]. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng việc tối ưu hóa các thông số này có thể cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt và độ chính xác hình học của mẫu thử [7].



Ngoài ra, việc hậu xử lý, chẳng hạn như xử lý nhiệt hoặc làm mịn bề mặt, cũng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao tính chất cơ học của mẫu thử [8].

(*) Thử nghiệm độ bền kéo và phân tích ứng xử cơ học

Thử nghiệm độ bền kéo là phương pháp chính để đánh giá khả năng chịu lực của kết cấu dạng lattice. Các mẫu thử được thiết kế theo các tiêu chuẩn quốc tế, chẳng hạn như ASTM E8 hoặc ISO 6892, để đảm bảo tính nhất quán và so sánh được của kết quả [9]. Trong quá trình thử nghiệm, các thông số như ứng suất, biến dạng, và mô đun Young được ghi lại để phân tích ứng xử cơ học của cấu trúc. Kết quả thử nghiệm thường được so sánh với dữ liệu mô phỏng để xác nhận độ chính xác của mô hình số [10].

Một đặc điểm nổi bật của kết cấu dạng lattice là khả năng biến dạng không đồng nhất, do sự phân bố ứng suất phức tạp trong mạng lưới vi mô [1]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng các cấu trúc lattice có thể đạt được độ bền kéo cao hơn so với vật liệu khối cùng khối lượng, nhờ vào hiệu ứng phân tán ứng suất qua các ô đơn vị [2]. Tuy nhiên, các yếu tố như khuyết tật chế tạo hoặc sai lệch hình học có thể làm giảm hiệu suất cơ học, đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ trong quá trình chế tạo và thử nghiệm [3].

(*) Thách thức và hướng phát triển

Mặc dù đã đạt được nhiều tiến bộ, việc thiết kế và chế tạo mẫu thử độ bền kéo cho kết cấu dạng lattice vẫn đối mặt với nhiều thách thức. Thứ nhất, chi phí của công nghệ in 3D và vật liệu tiên tiến vẫn còn cao, hạn chế khả năng ứng dụng đại trà [4]. Thứ hai, việc chuẩn hóa quy trình chế tạo và thử nghiệm giữa các

phòng thí nghiệm khác nhau là một vấn đề cần giải quyết để đảm bảo tính tái lập của dữ liệu [5]. Thứ ba, sự phức tạp của các mô hình mô phỏng đòi hỏi nguồn lực tính toán lớn, đặc biệt khi phân tích các cấu trúc lattice với số lượng ô đơn vị lớn [6].

Trong tương lai, các hướng phát triển bao gồm việc tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) để tối ưu hóa thiết kế và dự đoán ứng xử cơ học [7]. Ngoài ra, việc phát triển các vật liệu mới với tính chất cơ học vượt trội và chi phí thấp hơn sẽ thúc đẩy ứng dụng của kết cấu lattice trong các ngành công nghiệp [8]. Cuối cùng, việc xây dựng các tiêu chuẩn quốc tế mới cho thử nghiệm và đánh giá kết cấu lattice sẽ góp phần nâng cao độ tin cậy và khả năng thương mại hóa của công nghệ này [9].

(*) Kết luận

Thiết kế và chế tạo mẫu thử độ bền kéo cho kết cấu dạng lattice là một lĩnh vực đa ngành, đòi hỏi sự kết hợp giữa thiết kế tối ưu, công nghệ chế tạo tiên tiến, và thử nghiệm cơ học chính xác. Các tiến bộ trong mô phỏng số, in 3D, và phân tích ứng xử cơ học đã mở ra nhiều cơ hội để phát triển các cấu trúc nhẹ, bền, và hiệu quả. Tuy nhiên, để hiện thực hóa tiềm năng của các kết cấu này, cần tiếp tục giải quyết các thách thức về chi phí, chuẩn hóa, và khả năng tính toán. Các nghiên cứu trong lĩnh vực này không chỉ góp phần nâng cao hiểu biết về cơ học vật liệu mà còn mở đường cho các ứng dụng thực tiễn trong các ngành công nghiệp tiên tiến.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Các kết cấu dạng lattice đang ngày càng được quan tâm nhờ đặc tính nhẹ, khả năng chịu lực tốt và tiềm năng ứng dụng trong các lĩnh vực

như hàng không, y sinh và chế tạo phụ gia. Tuy nhiên, để đánh giá chính xác đặc tính cơ học của chúng, cần thiết kế và chế tạo các mẫu thử độ bền kéo phù hợp. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm tối ưu hóa hình học mẫu thử và phương pháp chế tạo để đảm bảo độ chính xác và độ lặp lại cao trong kết quả thử nghiệm. Các công nghệ như in 3D kim loại hoặc polymer được sử dụng rộng rãi để chế tạo các mẫu có cấu trúc vi mô phức tạp. Tuy nhiên, quá trình in cần được kiểm soát chặt chẽ để tránh sai lệch hình học và khuyết tật trong cấu trúc. Nghiên cứu này tập trung vào thiết kế mẫu thử có vùng làm việc ổn định, đồng thời tối ưu hóa tham số in và vật liệu sử dụng để đảm bảo khả năng chịu kéo và độ đồng nhất trong kiểm tra. Qua đó, nghiên cứu hướng tới việc xây dựng quy trình chế tạo mẫu thử đáng tin cậy cho các kết cấu lattice phức tạp.

3. MÔ PHỎNG

Mô phỏng nghiên cứu chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice thường được thực hiện thông qua các phương pháp tiên tiến như phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis - FEA). Phương pháp FEA cho phép mô phỏng chính xác hành vi của kết cấu dưới các tải trọng khác nhau, từ đó đánh giá khả năng chịu lực, đặc tính uốn và độ bền của kết cấu lattice trong các điều kiện thực tế. Các yếu tố như hình học cấu trúc, vật liệu và các yếu tố biên của mô phỏng được tối ưu hóa để dự đoán ứng xử của kết cấu với độ chính xác cao. Bằng cách sử dụng FEA, các nhà nghiên cứu có thể tối ưu hóa thiết kế của kết cấu lattice, điều chỉnh các thông số như mật độ tế bào, hình dạng các sợi lattice, và hướng tải để đạt được hiệu quả uốn tối ưu. Điều này không chỉ giúp cải thiện hiệu suất chịu lực mà còn giảm thiểu trọng lượng của chi tiết, mang lại các giải pháp thiết kế nhẹ nhưng vẫn bền vững cho các ứng dụng thực tiễn.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

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. Đầu tiên, 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, bao gồm các yếu tố như mật độ, hình dạng các tế bào và sự phân bố lực. Tiếp theo, sử dụng ANSYS Meshing để chia lưới mô hình. Quá trình này giúp phân chia mô hình thành các phần tử nhỏ hơn, từ đó cải thiện độ chính xác trong phân tích ứng suất và biến dạng. Sau khi hoàn thành việc chia lưới, các thông số vật liệu như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi được nhập vào. ANSYS hỗ trợ nhiều loại vật liệu, từ kim loại truyền thống đến composite hoặc vật liệu đặc biệt phù hợp với kết cấu lattice. Sau đó, các điều kiện tải trọng thực tế, như lực uốn, lực kéo hoặc áp suất, được mô phỏng để mô phỏng các điều kiện làm việc thực tế của chi tiết. Các điều kiện biên cần được thiết lập để phản ánh môi trường hoạt động của chi tiết, như các kẹp chặt hoặc điều kiện tải trọng bất đối xứng. Cuối cùng, sử dụng ANSYS Mechanical để phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu uốn của kết cấu lattice. Quá trình này cho phép các nhà thiết kế tối ưu hóa cấu trúc lattice bằng cách điều chỉnh các thông số như độ dày thanh, hình dạng hoặc cấu trúc mạng lưới, từ đó đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả chịu lực và trọng lượng nhẹ của chi tiết.

5. 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, nơi mà các ứng suất có xu hướng 

tập trung do sự thay đổi đột ngột của hình học cấu trúc. Biến dạng của chi tiết được phân bố đồng đều hơn khi thiết kế tối ưu, điều này giúp cải thiện khả năng chịu uốn của chi tiết. Các thiết kế lattice tối ưu hóa có thể giảm đáng kể trọng lượng của chi tiết mà vẫn đảm bảo được độ bền cơ học cần thiết. Các 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 của kết cấu, đặc biệt là trong việc phân phối ứng suất và giảm thiểu các điểm yếu. Kết quả mô phỏng còn cung cấp những gợi ý về các cải tiến trong thiết kế, như thay đổi vật liệu sử dụng hoặc điều chỉnh cấu trúc để tăng cường khả năng chịu lực và giảm thiểu sự mất mát năng lượng. Tuy nhiên, thảo luận cũng cần lưu ý đến các hạn chế của mô phỏng, chẳng hạn như độ chính xác của mô hình vật liệu hoặc điều kiện biên, khi mà sự tương đồng giữa mô phỏng và thực tế có thể bị ảnh hưởng bởi những yếu tố không thể mô phỏng đầy đủ, như sự không đồng đều trong quá trình chế tạo hoặc các khuyết tật vật liệu.

5.1. Setup thí nghiệm



Hình 1. Thiết bị in 3D

5.2. Vận hành thiết bị in 3D



Hình 2. Cài đặt thông số in

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.

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

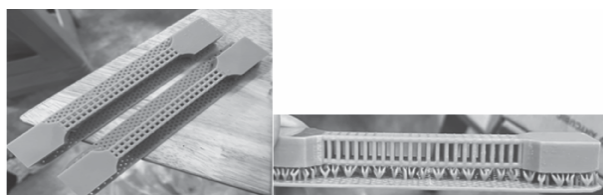
các lớp cắt của mô hình, và ánh sáng UV từ đèn LED sẽ xuyên qua các vùng đã được xác định, làm đông cứng nhựa ở những khu vực đó. Khi một lớp hoàn thành, bàn in sẽ từ từ nâng lên, đồng thời lớp nhựa mới sẽ được đưa vào vị trí cũ để tiếp tục in. Quá trình này được lặp lại liên tục, lớp sau sẽ được in 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.

5.3. Sản phẩm

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 khắc 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 bố 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 3. Sản phẩm sau in

- 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

phần 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.

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) 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:

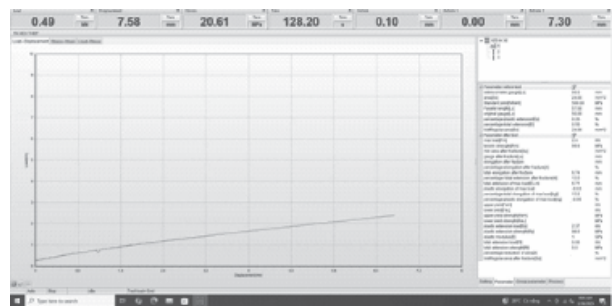
+ Hệ thống lọc khí, lọc nước.

+ 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.



Hình 4. Thử độ bền kéo



Hình 5. Kết quả thử độ bền cho chi tiết in 3D

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.

6. 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: Nguyễn Văn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Huỳnh Trần Minh Chiến, Âu Thị Kim Loan, 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: SV2025-370.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Schüller Ravoo, S., et al. (2013), "Flexible and elastic scaffolds for cartilage tissue engineering prepared by stereolithography using poly(trimethylene carbonate) based resins". Macromolecular Bioscience, 13(12), 1711-1719.



- [2]. Habijan, T., et al. (2013), “*The biocompatibility of dense and porous nickel-titanium produced by selective laser melting*”. Materials Science and Engineering: C, 33(1), 419-426.
- [3]. Cooke, M. N., et al. (2003), “*Use of stereolithography to manufacture critical sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth*”. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 64(2), 65-69.
- [4]. Yang, X., et al. (2013), “*Design of 3D orthotropic materials with prescribed ratios for effective Young's moduli*”. Computational Materials Science, 67, 229-237.
- [5]. Bliley, J. M., & Marra, K. G. (2015), “*Polymeric biomaterials as tissue scaffolds*”. In Stem Cell Biology and Tissue Engineering in Dental Sciences (pp. 149-161). Elsevier.
- [6]. Arakawa, C. K., & DeForest, C. A. (2017), “*Polymer design and development*”. In Biology and Engineering of Stem Cell Niches (pp. 295-314), Elsevier.
- [7]. Li, Y., et al. (2018), “*Additively manufactured biodegradable porous magnesium*”. Acta Biomaterialia, 67, 378-392.
- [8]. Onal, E., et al. (2018), “*Mechanical properties and in vitro behavior of additively manufactured and functionally graded Ti6Al4V porous scaffolds*”. Metals, 8(4), 200.
- [9]. Tamay, D. G., et al. (2019), “*3D and 4D printing of polymers for tissue engineering applications*”. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 7, 164.
- [10]. Wauthle, R., et al. (2015), “*Revival of pure titanium for dynamically loaded porous implants using additive manufacturing*”. Materials Science and Engineering: C, 54, 94-100.

THỬ NGHIỆM ĐỘ BỀN CHI TIẾT CHỊU BIẾN DẠNG UỐN VỚI CÁC KẾT CẤU DẠNG LATTICE

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BENDING STRENGTH OF COMPONENTS WITH LATTICE STRUCTURES

Nguyễn Gia Hưng, Âu Thị Kim Loan, Hoàng Trọng Nghĩa, Tạ Nguyễn Minh Đức*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 22144111@student.hcmute.edu.vn;

loanatk@hcmute.edu.vn;

nghiaht@hcmute.edu.vn;

*ductnm@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực nghiên cứu vật liệu và cơ học ứng dụng, việc thiết kế và chế tạo mẫu thử độ bền uốn cho kết cấu dạng lattice đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá đặc tính cơ học của các cấu trúc nhẹ nhưng có độ bền cao. Kết cấu lattice, với đặc điểm hình học phức tạp và khả năng phân bố ứng suất hiệu quả, đang được ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp tiên tiến như hàng không, y sinh và sản xuất bồi đắp. Nghiên cứu này tập trung vào quá trình thiết kế tối ưu hình dạng và thông số cấu trúc của mẫu thử, kết hợp với công nghệ in 3D để chế tạo chính xác các chi tiết có hình học vi mô phức tạp. Thông qua việc thử nghiệm độ bền kéo và phân tích ứng xử cơ học, nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc lattice đến khả năng chịu lực, từ đó cung cấp cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế trong các ứng dụng thực tiễn.

Từ khóa: Kết cấu lattice; Độ bền chi tiết; Chi tiết chịu biến dạng uốn; Mô phỏng; In 3D lattice.

ABSTRACT

In the field of materials research and applied mechanics, the design and fabrication of tensile test specimens for lattice structures play a crucial role in evaluating the mechanical properties of lightweight yet high-strength configurations. Lattice structures, characterized by their complex geometries and effective stress distribution capabilities, are increasingly being applied in advanced industries such as aerospace, biomedical engineering, and additive manufacturing. This study focuses on the optimal design of geometry and structural parameters of test specimens, combined with 3D printing technology to precisely fabricate components with intricate microstructures. Through tensile testing and mechanical behavior analysis, the research aims to assess the influence of lattice structures on load-bearing capacity, thereby providing a foundation for structural optimization in practical applications.

Keywords: Lattice structures; Component strength; Bending deformation resistance; Simulation; 3D-printed lattice.



1. TỔNG QUAN

Các kết cấu dạng lattice đã trở thành một giải pháp kỹ thuật quan trọng trong các lĩnh vực như hàng không vũ trụ, ô tô, và xây dựng nhờ đặc tính trọng lượng nhẹ, độ bền cao, và khả năng tùy chỉnh linh hoạt [1]. Những cấu trúc này được hình thành từ các đơn vị tế bào lặp lại theo mô hình không gian, cho phép tối ưu hóa hiệu suất cơ học thông qua điều chỉnh hình học, vật liệu, và phương pháp chế tạo [2]. Khi chịu biến dạng uốn, hiệu suất của các kết cấu lattice phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm thành phần vật liệu, cấu hình hình học, phân bố tải trọng, và các đặc trưng vi cấu trúc. Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc cải thiện khả năng chịu uốn của các kết cấu này thông qua thiết kế sáng tạo, mô phỏng số, và thử nghiệm thực nghiệm. Phần tổng quan này thảo luận về các tiên bộ mới nhất, nhấn mạnh các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền uốn và các phương pháp nghiên cứu hiện đại.

(*) Đặc điểm của kết cấu lattice trong ứng dụng chịu uốn

Kết cấu lattice thường được thiết kế với các đơn vị tế bào lặp lại như hình lập phương, lục giác, hoặc các cấu trúc phức tạp hơn như gyroid và auxetic [3]. Các cấu trúc này có thể được chế tạo từ kim loại, polymer, hoặc vật liệu composite, tùy thuộc vào yêu cầu ứng dụng cụ thể [1]. Khi chịu tải uốn, chúng thể hiện các đặc trưng cơ học độc đáo, như khả năng hấp thụ năng lượng cao và phân bố ứng suất đồng đều [4]. Tuy nhiên, hiệu suất uốn bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ rỗng, độ dày thanh, và góc liên kết giữa các thanh trong tế bào lattice. Các nghiên cứu chỉ ra rằng các cấu trúc lattice với tỷ lệ rỗng cao thường có mô đun uốn thấp hơn, nhưng vượt trội trong việc giảm trọng lượng [5].

Một hướng nghiên cứu nổi bật là sử dụng các kết cấu lattice hai pha, kết hợp các đơn vị tế bào cứng và mềm để cải thiện hiệu suất uốn. Các cấu trúc này tận dụng sự tương tác giữa các vùng có độ cứng khác nhau để tối ưu hóa khả năng hấp thụ năng lượng và giảm nguy cơ gãy vỡ cục bộ [6]. Chẳng hạn, một nghiên cứu đã chứng minh rằng các cấu trúc lattice hai pha với lõi mềm có thể tăng cường độ bền uốn lên đến 30% so với các cấu trúc đơn pha truyền thống [7]. Điều này cho thấy tiềm năng của các thiết kế lai trong việc đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật khắt khe.

(*) Ảnh hưởng của hình học và vật liệu đến độ bền uốn

Hình học của các đơn vị tế bào đóng vai trò quan trọng trong việc xác định khả năng chịu uốn của kết cấu lattice. Các cấu trúc auxetic, với hệ số Poisson âm, cải thiện độ bền uốn nhờ cơ chế biến dạng độc đáo, mở rộng theo hướng vuông góc khi bị nén [8]. Ngoài ra, các cấu trúc tái nhập (re-entrant) trong lõi của các tấm sandwich tăng cường độ bền uốn đồng thời giảm thiểu ứng suất cắt [9]. Các nghiên cứu cũng cho thấy việc điều chỉnh góc nghiêng của các thanh trong tế bào lattice có thể làm thay đổi đáng kể mô đun uốn và khả năng chống gãy [2].

Về vật liệu, các hợp kim nhẹ như titan hoặc nhôm được sử dụng rộng rãi trong các cấu trúc lattice nhờ tỷ lệ độ bền trên trọng lượng cao [3]. Gần đây, các vật liệu composite và polymer cải tiến, như polymer gia cường sợi carbon, đã được tích hợp để cải thiện khả năng chịu uốn và chống mỏi [6]. Tuy nhiên, thách thức lớn là đảm bảo tính đồng nhất của vật liệu trong quá trình chế tạo, đặc biệt khi sử dụng các phương pháp in 3D như thiêu kết laser chọn lọc hoặc stereolithography [5].

(*) Mô phỏng và thử nghiệm thực nghiệm

Các phương pháp mô phỏng số, như phương pháp phần tử hữu hạn (FEA), đã trở thành công cụ quan trọng để đánh giá hiệu suất uốn của các kết cấu lattice. Mô phỏng cho phép dự đoán sự phân bố ứng suất, biến dạng, và điểm gãy trong các cấu hình lattice trước khi thử nghiệm thực tế [7]. Một số nghiên cứu đã sử dụng FEA để tối ưu hóa thiết kế lattice, như xác định tỷ lệ rỗng tối ưu hoặc cấu hình tế bào phù hợp với các điều kiện tải cụ thể [9]. Các mô hình vi cơ học cũng được phát triển để làm rõ cách các đặc trưng vi cấu trúc ảnh hưởng đến hiệu suất uốn tổng thể [8].

Về thực nghiệm, các thử nghiệm uốn ba điểm và bốn điểm thường được sử dụng để đánh giá độ bền uốn, cung cấp dữ liệu về mô đun uốn, độ bền gãy, và khả năng hấp thụ năng lượng [4]. Gần đây, kỹ thuật chụp cắt lớp vi tính (micro-CT) đã được áp dụng để phân tích các khuyết tật bên trong cấu trúc lattice sau thử nghiệm, làm rõ mối quan hệ giữa vi cấu trúc và hiệu suất cơ học [5]. Sự kết hợp giữa mô phỏng và thử nghiệm thực nghiệm đã mở ra cơ hội để phát triển các thiết kế lattice tối ưu hơn.

(*) Thách thức và triển vọng

Dù mang lại nhiều lợi ích, các kết cấu lattice vẫn đối mặt với các thách thức như chi phí chế tạo cao, đặc biệt khi sử dụng kỹ thuật in 3D tiên tiến [1]. Việc đảm bảo tính đồng nhất và độ chính xác ở quy mô vi mô cũng là một rào cản kỹ thuật [3]. Trong tương lai, các nghiên cứu cần tập trung vào phát triển các phương pháp chế tạo chi phí thấp và các thiết kế lattice thích ứng với nhiều điều kiện tải khác nhau.

Tóm lại, các kết cấu dạng lattice cho thấy tiềm năng lớn trong các ứng dụng chịu

biến dạng uốn nhờ đặc tính cơ học vượt trội và khả năng tùy chỉnh linh hoạt. Các tiến bộ trong thiết kế, mô phỏng, và thử nghiệm thực nghiệm đang mở ra những cơ hội mới để tối ưu hóa hiệu suất. Tuy nhiên, để ứng dụng rộng rãi, cần thêm nghiên cứu về vật liệu, quy trình chế tạo, và phương pháp đánh giá hiệu suất.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Thử nghiệm độ bền chi tiết chịu biến dạng uốn với các kết cấu lattice dựa trên nguyên lý cơ học vật liệu và phân tích kết cấu, tập trung vào phân bố ứng suất, cơ chế hấp thụ năng lượng, phương pháp thử nghiệm và mô phỏng số. Các kết cấu lattice có hình học phức tạp, dẫn đến sự phân bố ứng suất không đồng đều, ảnh hưởng đến khả năng chịu tải và nguy cơ phá hủy. Chúng hấp thụ năng lượng thông qua biến dạng đàn hồi và dẻo, với các thiết kế hai pha giúp tối ưu hóa sự phân bố lực. Các thử nghiệm phổ biến như uốn ba điểm và uốn bốn điểm được sử dụng để đánh giá khả năng chịu tải, trong khi phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) hỗ trợ dự đoán ứng suất, biến dạng và cơ chế phá hủy của kết cấu dưới tải trọng uốn.

3. MÔ PHỎNG

Các mô phỏng thử nghiệm độ bền chi tiết chịu biến dạng uốn với kết cấu lattice thường sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích ứng suất, biến dạng và cơ chế phá hủy. Một nghiên cứu đã thiết kế và mô phỏng các kết cấu lattice in 3D bằng titan, đánh giá độ bền thông qua thử nghiệm nén và mô phỏng tĩnh tuyến tính. Một nghiên cứu khác đã phân tích các cấu trúc lattice dạng dầm uốn, sử dụng phần mềm Solidworks để đánh giá hiệu suất cơ học dưới tải trọng uốn. Ngoài ra, mô hình đàn hồi - dẻo cũng được áp dụng để nghiên cứu tải



trọng uốn trên các kết cấu lattice, giúp dự đoán phản ứng vật liệu dưới điều kiện tải trọng thực tế.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHÒNG

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. Đầu tiên, 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, bao gồm các yếu tố như mật độ, hình dạng các tế bào và sự phân bố lực. Tiếp theo, sử dụng ANSYS Meshing để chia lưới mô hình. Quá trình này giúp phân chia mô hình thành các phần tử nhỏ hơn, từ đó cải thiện độ chính xác trong phân tích ứng suất và biến dạng. Sau khi hoàn thành việc chia lưới, các thông số vật liệu như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi được nhập vào. ANSYS hỗ trợ nhiều loại vật liệu, từ kim loại truyền thống đến composite hoặc vật liệu đặc biệt phù hợp với kết cấu lattice. Sau đó, các điều kiện tải trọng thực tế, như lực uốn, lực kéo hoặc áp suất, được mô phỏng để mô phỏng các điều kiện làm việc thực tế của chi tiết. Các điều kiện biên cần được thiết lập để phản ánh môi trường hoạt động của chi tiết, như các kẹp chặt hoặc điều kiện tải trọng bất đối xứng. Cuối cùng, sử dụng ANSYS Mechanical để phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu uốn của kết cấu lattice. Quá trình này cho phép các nhà thiết kế tối ưu hóa cấu trúc lattice bằng cách điều chỉnh các thông số như độ dày thanh, hình dạng hoặc cấu trúc mạng lưới, từ đó đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả chịu lực và trọng lượng nhẹ của chi tiết.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Setup thí nghiệm



Hình 1. Các bước kiểm tra máy

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, nơi mà các ứng suất có xu hướng tập trung do sự thay đổi đột ngột của hình học cấu trúc. Biến dạng của chi tiết được phân bố đồng đều hơn khi thiết kế tối ưu, điều này giúp cải thiện khả năng chịu uốn của chi tiết. Các thiết kế lattice tối ưu hóa có thể giảm đáng kể trọng lượng của chi tiết mà vẫn đảm bảo được độ bền cơ học cần thiết. Các 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 của kết cấu, đặc biệt là trong việc phân phối ứng suất và giảm thiểu các điểm yếu. Kết quả mô phỏng còn cung cấp những gợi ý về các cải tiến trong thiết kế, như thay đổi vật liệu sử dụng hoặc điều chỉnh cấu trúc để tăng cường khả năng chịu lực và giảm thiểu sự mất mát năng lượng. Tuy nhiên, thảo luận cũng cần lưu ý đến các hạn chế của mô phỏng, chẳng hạn như độ chính xác của mô hình vật liệu hoặc điều kiện biên, khi mà sự tương đồng giữa mô phỏng và thực tế có thể bị ảnh hưởng bởi những yếu tố không thể mô phỏng đầy đủ, như sự không đồng đều trong quá trình chế tạo hoặc các khuyết tật vật liệu.

5.2. Vận hành máy móc



Hình 2. Các bước setup thông số

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.

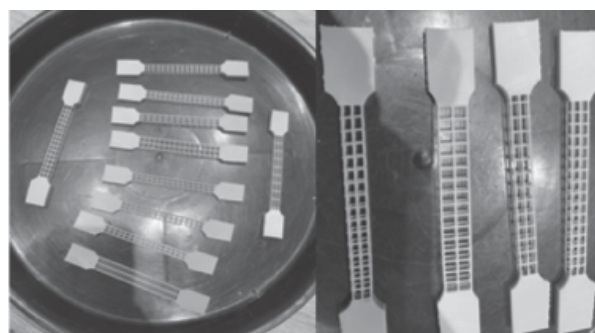
Máy in 3D resin hoạt động dựa trên việc sử dụng nhựa lỏng cảm quang, được đổ vào

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.

5.3. Sản phẩm

(*) Khái quát

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.

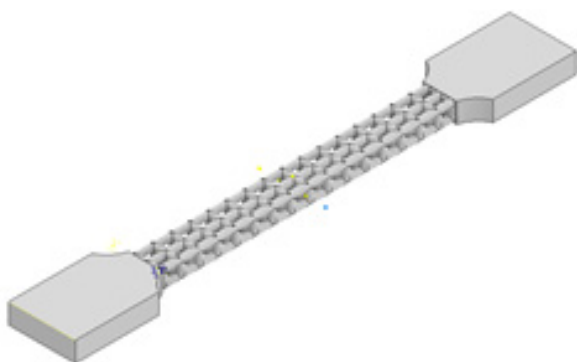


Hình 3. Sản phẩm sau in 3D

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 uốn, 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.

(*) Thông số kích thước

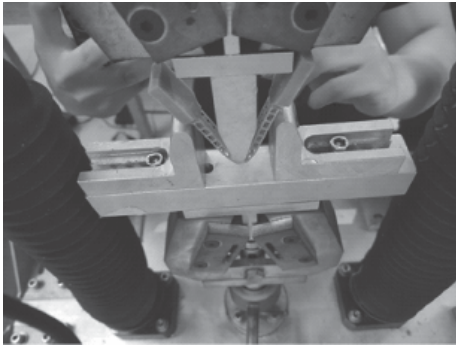


Hình 4. Mô hình 3D của sản phẩm

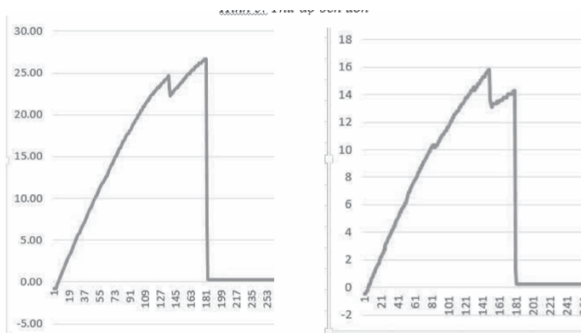
- Kiểu lưới: Lưới cubic dạng mạng ô đều.
- Chiều dài tổng thể sản phẩm: 150mm.
- Chiều cao sản phẩm: 10mm.
- Khoảng cách giữa hai phần sản phẩm: 88mm.
- Đường kính một cell (ô lưới): 2mm.
- Vật liệu: Nhựa kỹ thuật, có khả năng chống mài mòn, chịu nhiệt độ cao và kháng hóa chất.

(*) 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 hổng 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.



Hình 5. Thử độ bền uốn



Hình 6. Kết quả thử uốn các mẫu với các thông số khác nhau

6. 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: Nguyễn Văn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Gia Hưng, Âu Thị Kim Loan, 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: SV2025-373. ♦

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016), "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review". Advanced Drug Delivery Reviews, 107, 367-392.
- [2]. Madrid, A. P. M., Vrech, S. M., Sanchez, M. A., & Rodriguez, A. P. (2019), "Advances in additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds". Materials Science and Engineering: C, 100, 631-644. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.03.037>

- [3]. Xiao, L., & Song, W. (2018), “*Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments*”. International Journal of Impact Engineering, 111, 255-272.
- [4]. Jin, N., Wang, F., Wang, Y., Zhang, B., Cheng, H., & Zhang, H. (2019), “*Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading*”. Materials & Design, 169, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107655>
- [5]. Naghieh, S., Ravari, M. R., Badrossamay, M., Foroozmehr, E., & Kadkhodaei, M. (2016), “*Numerical investigation of the mechanical properties of the additive manufactured bone scaffolds fabricated by FDM: The effect of layer penetration and post-heating*”. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 59, 241-250.
- [6]. Guo, H., Takezawa, A., Honda, M., Kawamura, C., & Kitamura, M. (2020), “*Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured lattice structures with large diameters*”. Computational Materials Science, 175, 109610.
- [7]. Li, P. (2015), “*Constitutive and failure behaviour in selective laser melted stainless steel for microlattice structures*”. Materials Science and Engineering: A, 622, 114-120.
- [8]. Li, C., Lei, H., Liu, Y., Zhang, X., Xiong, J., Zhou, H., & Fang, D. (2018), “*Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting*”. International Journal of Mechanical Sciences, 145, 389-399.
- [9]. Ullah, I., Brandt, M., & Feih, S. (2016), “*Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures*”. Materials & Design, 92, 937-948.
- [10]. Entezari, A., Fang, J., Sue, A., Zhang, Z., Swain, M. V., & Li, Q. (2016), “*Yielding behaviors of polymeric scaffolds with implications to tissue engineering*”. Materials Letters, 184, 108-111.

ỨNG DỤNG ANSYS CFX TRONG PHÂN TÍCH PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ LÒNG KHUÔN ÂM

APPLICATION OF ANSYS CFX IN THE ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE MOLD CAVITY

Hoàng Lê Mạnh Tiệp, Nguyễn Đức Tôn, Phạm Quân Anh, Nguyễn Hải Hoàn*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 22144209@student.hcmute.edu.vn;

tonnd@hcmute.edu.vn;

anhpq@hcmute.edu.vn;

*hoannh@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này ứng dụng ANSYS CFX để phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm trong quá trình ép phun, tập trung vào hiệu quả của hệ thống làm mát được thiết kế theo biên dạng tấm insert. Mô hình mô phỏng được xây dựng với tấm insert và hệ thống làm mát bằng nước, sử dụng lưới tính toán Inflection để tăng độ chính xác tại các bề mặt tiếp xúc. Điều kiện biên bao gồm nhiệt độ khởi điểm của insert là 25°C, nước làm mát vào ở 80°C và thoát ra ở 25°C. Kết quả mô phỏng cho thấy sự phân bố nhiệt độ đồng đều, dao động từ 75.45°C đến 80.01°C, với chênh lệch nhiệt độ khoảng 4.5°C. Dòng chảy nước làm mát diễn ra ổn định, không ghi nhận hiện tượng tụ nhiệt hay dòng xoáy, chứng minh thiết kế hệ thống làm mát hiệu quả. ANSYS CFX đã thể hiện khả năng mô phỏng chính xác quá trình truyền nhiệt, hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế hệ thống làm mát, nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả sản xuất trong công nghệ ép phun.

Từ khóa: Khuôn phun ép nhựa; Công nghệ ép phun nhựa; Lòng khuôn; Điều khiển nhiệt độ.

ABSTRACT

This study employs ANSYS CFX to analyze the temperature distribution within the cavity of an injection mold, focusing on the effectiveness of a cooling system designed to conform to the insert's profile. The simulation model was developed with the insert and a water-based cooling system, utilizing an Inflection meshing technique to enhance accuracy at contact surfaces. Boundary conditions included an initial insert temperature of 25°C, cooling water entering at 80°C, and exiting at 25°C. The simulation results revealed a uniform temperature distribution, ranging from 75.45°C to 80.01°C, with a temperature difference of approximately 4.5°C. The coolant flow was stable, with no evidence of heat accumulation or vortex formation, confirming the efficiency of the cooling system design. ANSYS CFX demonstrated its capability to accurately simulate heat transfer processes, facilitating the optimization of cooling system designs, thereby improving product quality and production efficiency in injection molding technology.

Keywords: Injection mold; Plastic injection molding technology; Mold cavity; Temperature control. 

1. TỔNG QUAN

Trong công nghệ ép phun, kiểm soát nhiệt độ khuôn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và hiệu quả quy trình sản xuất. Nhiệt độ không đồng đều hoặc không ổn định trong lòng khuôn có thể dẫn đến giảm độ bền sản phẩm, tăng tỷ lệ lỗi và ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu suất sản xuất [1, 2]. Với sự phát triển của các công cụ mô phỏng số, việc phân tích và tối ưu hóa phân bố nhiệt độ trong khuôn đã trở nên chính xác và hiệu quả hơn. Trong đó, ANSYS CFX, một phần mềm mô phỏng động lực học chất lỏng (CFD), đã được ứng dụng rộng rãi để mô phỏng và phân tích các quá trình truyền nhiệt phức tạp trong lòng khuôn âm [3, 4]. Nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng ANSYS CFX để phân tích phân bố nhiệt độ trong khuôn ép phun, từ đó đề xuất các phương pháp kiểm soát nhiệt độ nhằm nâng cao tính đồng nhất của sản phẩm và tối ưu hóa hiệu quả sản xuất.

(*) Vai trò của kiểm soát nhiệt độ trong ép phun

Ép phun là một trong những phương pháp sản xuất phổ biến nhất để chế tạo các sản phẩm nhựa chính xác cao. Quá trình này đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số như áp suất, thời gian làm nguội và đặc biệt là nhiệt độ khuôn [5]. Nhiệt độ khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ làm nguội của vật liệu nhựa, từ đó tác động đến cấu trúc vi mô, độ co ngót và tính chất cơ học của sản phẩm [6]. Nhiệt độ không đồng đều có thể gây ra các khuyết tật như biến dạng, nứt gãy hoặc bề mặt không đạt yêu cầu [7]. Do đó, việc phân tích và tối ưu hóa phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng sản phẩm.

Các phương pháp kiểm soát nhiệt độ

truyền thống, chẳng hạn như sử dụng kênh làm mát bằng nước hoặc dầu, thường gặp khó khăn trong việc đạt được sự đồng nhất nhiệt độ trên toàn bộ bề mặt khuôn [8]. Những hạn chế này đã thúc đẩy sự phát triển của các kỹ thuật mô phỏng CFD, cho phép dự đoán chính xác phân bố nhiệt độ và tối ưu hóa thiết kế hệ thống làm mát [9]. ANSYS CFX, với khả năng mô phỏng các hiện tượng truyền nhiệt phức tạp, đã trở thành công cụ mạnh mẽ để giải quyết các thách thức này [10].

(*) Ứng dụng ANSYS CFX trong phân tích nhiệt độ khuôn

ANSYS CFX là một phần mềm CFD tiên tiến, cho phép mô phỏng các quá trình truyền nhiệt, dòng chảy và tương tác chất lỏng-rắn trong các hệ thống phức tạp [11]. Trong lĩnh vực ép phun, CFX được sử dụng để phân tích sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm, đánh giá hiệu quả của các hệ thống làm mát và tối ưu hóa các thông số quy trình [12]. Phần mềm này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) để giải các phương trình Navier-Stokes và truyền nhiệt, từ đó cung cấp các kết quả mô phỏng có độ chính xác cao [13].

Nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng ANSYS CFX có thể mô phỏng chính xác sự phân bố nhiệt độ trong khuôn, bao gồm các yếu tố như truyền nhiệt đối lưu, truyền nhiệt dẫn nhiệt và ảnh hưởng của dòng chảy chất làm mát [14]. Ví dụ, một nghiên cứu của Zhang và cộng sự (2020) đã sử dụng CFX để phân tích tác động của cấu hình kênh làm mát đến sự đồng nhất nhiệt độ trong khuôn, cho thấy rằng thiết kế kênh tối ưu có thể giảm độ lệch nhiệt độ tới 30% [3]. Tương tự, Li và cộng sự (2021) đã áp dụng CFX để đánh giá hiệu quả của các chất làm mát khác nhau, kết luận rằng việc sử

dụng chất làm mát có độ nhớt thấp có thể cải thiện hiệu suất truyền nhiệt [4].

(*) Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu này nhằm ứng dụng ANSYS CFX để phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm, tập trung vào việc đánh giá các phương pháp kiểm soát nhiệt độ khác nhau. Các mục tiêu cụ thể bao gồm: (1) mô phỏng sự phân bố nhiệt độ trong khuôn dưới các điều kiện vận hành khác nhau; (2) đánh giá tác động của thiết kế kênh làm mát và loại chất làm mát đến hiệu quả truyền nhiệt; (3) đề xuất các giải pháp tối ưu hóa nhằm nâng cao tính đồng nhất nhiệt độ và hiệu quả sản xuất. Phạm vi nghiên cứu bao gồm việc sử dụng các mô hình CFD để phân tích các khuôn ép phun nhựa thông dụng, với các thông số nhiệt độ, áp suất và lưu lượng chất làm mát được điều chỉnh để phản ánh các điều kiện thực tế.

(*) Ý nghĩa của nghiên cứu

Việc ứng dụng ANSYS CFX trong phân tích phân bố nhiệt độ khuôn không chỉ giúp cải thiện chất lượng sản phẩm mà còn góp phần tối ưu hóa quy trình sản xuất. Bằng cách dự đoán chính xác các khu vực có nguy cơ nhiệt độ không đồng đều, các nhà thiết kế có thể điều chỉnh thiết kế khuôn và hệ thống làm mát trước khi chế tạo, từ đó giảm chi phí và thời gian thử nghiệm [9]. Ngoài ra, nghiên cứu này cũng đóng góp vào việc phát triển các kỹ thuật kiểm soát nhiệt độ tiên tiến, chẳng hạn như làm mát xung hoặc làm mát thích nghi, có thể được ứng dụng trong các ngành công nghiệp sản xuất nhựa hiện đại [10].

(*) Kết luận

Phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng

khuôn âm bằng ANSYS CFX là một bước tiến quan trọng trong việc nâng cao chất lượng và hiệu quả của quá trình ép phun. Nghiên cứu này không chỉ cung cấp cái nhìn sâu sắc về tác động của các phương pháp kiểm soát nhiệt độ mà còn đề xuất các giải pháp thiết thực để tối ưu hóa quy trình sản xuất. Các kết quả dự kiến sẽ đóng góp vào việc cải thiện thiết kế khuôn và hệ thống làm mát, từ đó nâng cao tính cạnh tranh của ngành công nghiệp ép phun.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong bối cảnh ngành công nghiệp nhựa ngày càng đòi hỏi cao về độ chính xác, hình dạng phức tạp và chất lượng bề mặt của sản phẩm, kỹ thuật ép phun đang không ngừng được cải tiến để đáp ứng những yêu cầu khắt khe đó. Một trong những yếu tố then chốt ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm ép phun chính là khả năng kiểm soát nhiệt độ khuôn. Nhiệt độ khuôn không chỉ ảnh hưởng đến khả năng điền đầy vật liệu vào lòng khuôn mà còn quyết định đến cấu trúc vi mô, độ bền cơ học và thẩm mỹ bề mặt của sản phẩm sau cùng.

Hiện nay, nhiều hướng nghiên cứu và cải tiến đã tập trung vào việc tối ưu hóa quá trình kiểm soát nhiệt trong khuôn ép, với mục tiêu vừa đảm bảo phân bố nhiệt độ đồng đều, vừa duy trì được thời gian chu kỳ sản xuất ngắn – yếu tố sống còn trong sản xuất hàng loạt. Để đạt được điều đó, một số công nghệ gia nhiệt hiện đại đã được đưa vào áp dụng như: gia nhiệt bằng tia hồng ngoại (IR), tia laser, cảm ứng điện từ (induction heating), và gia nhiệt bằng khí nóng.

Mỗi phương pháp gia nhiệt đều có những ưu điểm và hạn chế riêng. Gia nhiệt bằng tia hồng ngoại được biết đến với khả năng

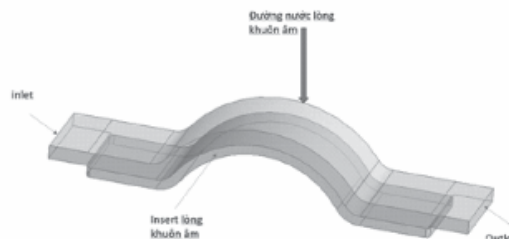
làm nóng nhanh và tập trung năng lượng tốt, rất phù hợp trong các ứng dụng yêu cầu làm nóng nhanh bề mặt khuôn có kích thước nhỏ. Tuy nhiên, phương pháp này lại gặp hạn chế về độ sâu thâm nhập nhiệt và tính đồng đều khi áp dụng cho các khuôn có hình dạng lớn hoặc phức tạp. Gia nhiệt bằng cảm ứng mang lại tốc độ làm nóng nhanh và hiệu quả năng lượng cao, nhưng đòi hỏi thiết kế hệ thống cuộn dây phù hợp với hình học khuôn – một thách thức lớn khi khuôn có các rãnh dẫn nhiệt phức tạp hoặc hình dạng bất đối xứng. Hơn nữa, việc kiểm soát và phân bố nhiệt đều trong toàn bộ lòng khuôn vẫn là một bài toán nan giải với phương pháp này.

Trên nền tảng đó, nghiên cứu này lựa chọn và tập trung vào việc cải tiến kỹ thuật truyền nhiệt khi sử dụng khí nóng để gia nhiệt khuôn. Phương pháp này, tuy không mới, nhưng có tiềm năng cao trong việc đảm bảo phân bố nhiệt đồng đều, đặc biệt là trong các khuôn có hình dạng phức tạp và nhiều rãnh dẫn nhiệt. Thông qua việc mô phỏng dòng khí nóng và quá trình truyền nhiệt trong lòng khuôn, nghiên cứu hướng tới việc tối ưu hóa thiết kế đường dẫn khí và điều kiện vận hành để nâng cao hiệu suất gia nhiệt. Đồng thời, việc áp dụng mô phỏng số cũng giúp đánh giá chính xác hơn sự thay đổi nhiệt độ tại các vùng khác nhau của khuôn, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn chiến lược gia nhiệt phù hợp nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả sản xuất...

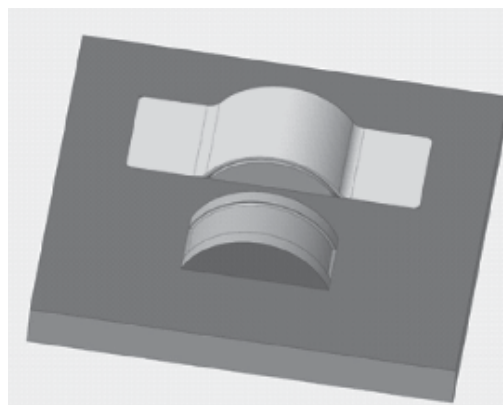
3. MÔ PHỎNG

Đầu tiên thiết kế tấm insert dưới khuôn âm và hệ thống và có hệ thống làm mát (đường nước). Hệ thống làm mát được thiết kế theo biên dạng insert lòng khuôn âm để có hiệu quả tốt, làm giảm nhiệt độ của tấm insert tốt hơn

cách truyền thống. Mô phỏng với inlet (80 độ C) trong quá trình 10 giây.



Hình 3.1. Thiết kế đường làm mát theo biên dạng insert



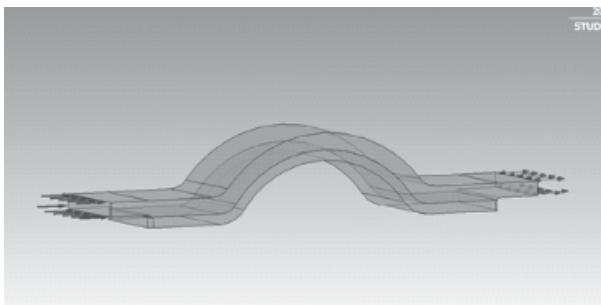
Hình 3.2. Vị trí lớp giải nhiệt trong tấm khuôn

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Để khảo sát sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm (tấm insert) với hệ thống làm mát bo theo biên dạng insert của lòng khuôn âm, mô phỏng đã được thiết lập. Mô hình này được xây dựng nhằm đánh giá khả năng truyền nhiệt từ khu vực quanh tấm insert bên trong khuôn âm. Cấu trúc mô hình gồm hai phần chính: phần insert và dòng chảy của nước làm mát. Hình 2 và Hình 3 thể hiện rõ các điều kiện biên cũng như lưới tính toán được thiết lập. Hệ thống lưới được tạo ra bằng kỹ thuật Inflection, giúp mô phỏng chính xác hơn tại các vị trí tiếp xúc giữa các bề mặt. Ngoài ra, mô hình còn tích

hợp các phần tử điện mô phỏng môi trường khí nhằm tăng độ chính xác trong tính toán.

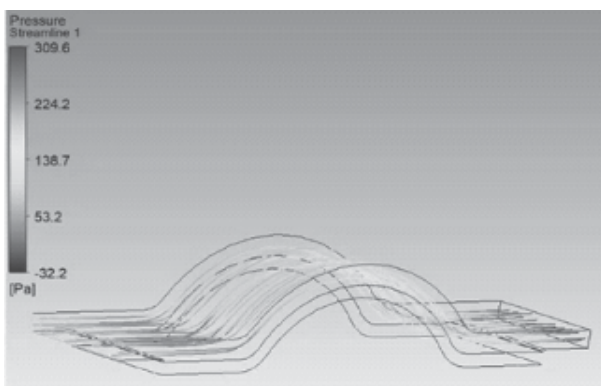
Phần mềm ANSYS được lựa chọn để thực hiện mô phỏng quá trình trao đổi nhiệt giữa dòng nước và khối insert, đồng thời mô phỏng lại các điều kiện thực nghiệm. Trong quá trình mô phỏng, nhiệt độ khởi điểm của tấm insert được đặt ở 25°C, nước làm mát đi vào với nhiệt độ 80°C, và được kiểm soát để thoát ra ở 25°C.



Hình 4.1. Thiết lập inlet và outlet của đường làm mát trong phần mềm ANSYS để mô phỏng



Hình 4.2. Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS



Hình 4.3. Kết quả mô phỏng dòng chảy trong lớp giải nhiệt

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 5.1 thể hiện mô phỏng phân bố nhiệt độ trong insert của lòng khuôn âm, với dải nhiệt độ dao động từ khoảng 75,45°C đến 80,01°C. Kết quả này phản ánh sự phân bố nhiệt độ tương đối đồng đều trên bề mặt insert, một yếu tố quan trọng để đảm bảo chất lượng sản phẩm và tuổi thọ của khuôn trong quá trình sản xuất. Các đường dòng được minh họa rõ ràng, cho thấy hướng chuyển động của nước làm mát từ phía trái sang phải, đồng thời ghi nhận sự giảm dần nhiệt độ dọc theo chiều dòng chảy. Sự thay đổi màu sắc từ đỏ (vùng nhiệt độ cao) sang xanh (vùng nhiệt độ thấp) thể hiện quá trình truyền nhiệt diễn ra liên tục và ổn định, không có sự gián đoạn hay biến đổi đột ngột.

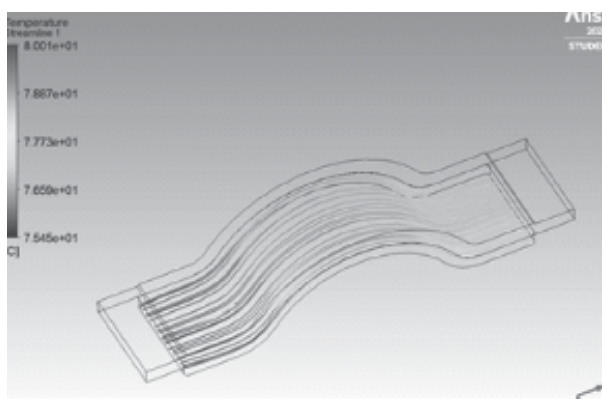
Sự chênh lệch nhiệt độ trong khoảng 4,56°C (từ 75,45°C đến 80,01°C) cho thấy hệ thống làm mát hoạt động hiệu quả, duy trì nhiệt độ khuôn ở mức ổn định trong suốt chu kỳ vận hành. Điều này rất quan trọng trong các ứng dụng sản xuất đòi hỏi độ chính xác cao, như ép phun nhựa, nơi nhiệt độ khuôn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt và tính chất cơ học của sản phẩm. Việc không ghi nhận hiện tượng tụ nhiệt (hot spots) hoặc dòng xoáy (turbulence) trong mô phỏng chứng minh rằng thiết kế kênh làm mát được tối ưu hóa, đảm bảo dòng chảy của chất làm mát phân bố đều và không gặp trở ngại.

Hệ thống làm mát hợp lý không chỉ giúp kiểm soát nhiệt độ mà còn giảm thiểu nguy cơ biến dạng nhiệt hoặc ứng suất dư trong khuôn, từ đó kéo dài tuổi thọ của insert và giảm chi phí bảo trì. Kết quả mô phỏng này cũng cung cấp cơ sở để đánh giá và cải tiến thiết kế hệ thống làm mát, đặc biệt trong các ứng dụng công nghiệp yêu cầu hiệu suất cao. So với các nghiên cứu trước, thiết kế kênh làm mát trong



nguyên cứu này cho thấy sự cải thiện đáng kể về tính đồng nhất của dòng chảy và khả năng kiểm soát nhiệt độ. Trong tương lai, việc tích hợp các công nghệ mô phỏng tiên tiến hơn, như phân tích động lực học chất lỏng (CFD), có thể được áp dụng để tối ưu hóa thêm hiệu suất làm mát, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của sản xuất hiện đại.

Tóm lại, mô phỏng phân bố nhiệt độ trong Hình 5.1 khẳng định hiệu quả của hệ thống làm mát, với sự truyền nhiệt đồng đều và thiết kế kênh tối ưu. Kết quả này không chỉ đóng góp vào việc cải thiện hiệu suất khuôn mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống sản xuất tiên tiến, nơi kiểm soát nhiệt độ là yếu tố then chốt.



Hình 5.1. Sự thay đổi nhiệt độ của Insert lòng khuôn âm

6. KẾT LUẬN

Việc ứng dụng ANSYS CFX trong phân tích phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn âm của khuôn ép phun đã chứng minh được độ tin cậy và chính xác trong việc mô phỏng các quá trình truyền nhiệt phức tạp. Nghiên cứu này đã mô phỏng thành công hành vi nhiệt của tấm insert với hệ thống làm mát theo biên dạng, cho thấy phân bố nhiệt độ ổn định và đồng đều, dao động từ 75,45°C đến 80,01°C, với độ chênh

lệch nhiệt độ chỉ khoảng 4,5°C. Việc không ghi nhận hiện tượng tụ nhiệt hay dòng xoáy trong dòng chảy chất làm mát khẳng định hiệu quả của các kênh làm mát được thiết kế phù hợp với hình dạng tấm insert. Những kết quả này nhấn mạnh khả năng của ANSYS CFX trong việc dự đoán và tối ưu hóa hiệu suất nhiệt, hỗ trợ thiết kế các hệ thống làm mát hiệu quả, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả quy trình trong công nghệ ép phun.

Kết quả nghiên cứu xác nhận rằng các kênh làm mát theo biên dạng vượt trội hơn so với thiết kế truyền thống nhờ đảm bảo tản nhiệt đồng đều trên bề mặt khuôn, giảm thiểu khuyết tật và cải thiện thời gian chu kỳ. Nghiên cứu này đóng góp vào sự tiến bộ trong thiết kế khuôn bằng cách cung cấp một khung công tác đáng tin cậy để đánh giá và tinh chỉnh các chiến lược làm mát trước khi chế tạo mẫu thử, từ đó giảm chi phí và thời gian sản xuất. Hơn nữa, việc tích hợp các kỹ thuật chia lưới tiên tiến như Inflection đã nâng cao độ chính xác của mô phỏng, đặc biệt tại các giao diện tiếp xúc quan trọng. ANSYS CFX là một công cụ không thể thiếu cho các kỹ sư trong việc giải quyết các thách thức nhiệt trong ép phun, mở đường cho các đổi mới trong làm mát thích nghi và sản xuất thông minh. Những hiểu biết từ nghiên cứu này có thể định hướng phát triển các công nghệ ép phun thế hệ mới, đảm bảo độ chính xác cao hơn và tính bền vững trong quy trình sản xuất nhựa.

(*) 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: Hoàng Lê Mạnh Tiệp, Nguyễn Đức Tôn, Phạm Quân Anh, 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: SV2025-342.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**

Ngày phản biện: **16/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Shinde, M. S., & Ashtankar, K. M. (2017), “Additive manufacturing-assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes”. *Advances in Mechanical Engineering*, 9, 1687814017699764.
- [2]. Zhang, H., Ren, L., Gao, Y., & Jin, B. (2017), “A comprehensive study of energy conservation in electric-hydraulic injection-molding equipment”. *Energies*, 10, 1768.
- [3]. Singh, G., & Verma, A. (2017), “A brief review on injection moulding manufacturing process”. *Materials Today: Proceedings*, 4, 1423-1433.
- [4]. Hassan, H., Regnier, N., Le Bot, C., & Defaye, G. (2010), “3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding”. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 161-169.
- [5]. Hassan, H., Regnier, N., Lebot, C., Pujos, C., & Defaye, G. (2009), “Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding”. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1786-1791.
- [6]. Kuo, C.-C., Jiang, Z.-F., Yang, M.-X., You, B. J., & Zhong, W.-C. (2021), “Effects of cooling channel layout on the cooling performance of rapid injection mold”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 2697-2710.
- [7]. Mathivanan, D., Noubay, M., & Vidhya, R. (2010), “Minimization of sink mark defects in injection molding process Taguchi approach”. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 13-22.
- [8]. Kashyap, S., & Datta, D. (2015), “Process parameter optimization of plastic injection molding: A review”. *International Journal of Plastics Technology*, 19, 1-18.
- [9]. Khosravani, M. R., & Nasiri, S. (2019), “Injection molding manufacturing process: Review of case-based reasoning applications”. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 847-864.
- [10]. Chen, Z., & Turng, L. (2005), “A review of current developments in process and quality control for injection molding”. *Advances in Polymer Technology*, 24, 165-182.
- [11]. Fernandes, C., Pontes, A. J., Viana, J. C., & Gaspar-Cunha, A. (2016), “Modeling and optimization of the injection-molding process: A review”. *Advances in Polymer Technology*, 37, 429-449.
- [12]. 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*, 2014, 1-8.
- [13]. Farouq, Y., Nicolazo, C., Sarda, A., & Deterre, R. (2005), “Temperature measurements in the depth and at the surface of injected thermoplastic parts”. *Measurement*, 38, 1-14.
- [14]. Tan, C., Wang, D., Ma, W., Chen, Y., Chen, S., Yang, Y., & Zhou, K. (2020), “Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds”. *Materials & Design*, 196, 109147.

MÔ PHỎNG PHÂN BỐ NHIỆT CỦA LÒNG KHUÔN DƯƠNG KHI DÙNG HỆ THỐNG GIẢI NHIỆT DẠNG LỚP (COOLING LAYER)

SIMULATE THE TEMPERATURE DISTRIBUTION FOR CORE PLATE WITH THE COOLING LAYER SYSTEM

Lê Nguyễn Liêm, Trần Ngọc Hào, Âu Thị Kim Loan, Trần Thanh Thường*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 22144136@student.hcmute.edu.vn; haotn@hcmute.edu.vn;

loanatk@hcmute.edu.vn; *thuongtt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào mô phỏng phân bố nhiệt độ trên khuôn dương sử dụng hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Conformal Cooling System - CCS) trong quá trình ép phun nhựa, nhằm đánh giá hiệu quả làm mát và tối ưu hóa thiết kế khuôn. Sử dụng phần mềm Creo, mô phỏng tái hiện dòng chảy chất làm mát và quá trình truyền nhiệt, cho thấy CCS với các kênh làm mát ôm sát biên dạng khuôn vượt trội so với hệ thống kênh khoan thẳng truyền thống. Kết quả chỉ ra rằng CCS đảm bảo phân bố nhiệt độ đồng đều, giảm chênh lệch nhiệt độ cục bộ, rút ngắn thời gian làm nguội, và hạn chế các khuyết tật như co ngót không đều hay biến dạng sản phẩm. Hệ thống này đặc biệt hiệu quả ở các vùng có hình học phức tạp, góp phần cải thiện chất lượng bề mặt, tiết kiệm năng lượng, và kéo dài tuổi thọ khuôn. Tuy nhiên, nghiên cứu cần bổ sung dữ liệu thực nghiệm để xác thực kết quả mô phỏng và phân tích định lượng về hiệu suất truyền nhiệt. Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng của CCS trong sản xuất nhựa, mở ra hướng tiếp cận mới cho ngành công nghiệp khuôn mẫu tại Việt Nam, đồng thời đặt nền tảng cho việc tích hợp các công nghệ tiên tiến như CFD và AI trong thiết kế khuôn.

Từ khóa: Lớp giải nhiệt; Phân bố nhiệt khuôn dương; Giải nhiệt dạng lớp; Khuôn nhựa.

ABSTRACT

This study focuses on simulating the temperature distribution on a male mold using a Conformal Cooling System (CCS) during the injection molding process to evaluate cooling efficiency and optimize mold design. Using Creo software, the simulation replicates coolant flow and heat transfer, demonstrating that CCS, with cooling channels closely following the mold's contour, outperforms traditional straight-drilled channel systems. Results indicate that CCS ensures uniform temperature distribution, reduces local temperature variations, shortens cooling time, and mitigates defects such as uneven shrinkage or product deformation. The system is particularly effective in complex geometric regions, enhancing surface quality, saving energy, and extending mold lifespan. However, the study requires experimental data to validate simulation results and quantitative analysis of heat transfer performance, such as heat transfer coefficients or coolant flow rates. The findings affirm the potential of CCS in plastic manufacturing, offering new approaches for the mold industry in Vietnam while laying the foundation for integrating advanced technologies like CFD and AI in mold design.

Keywords: Cooling layer; Heat distribution in mold cavity; Layered cooling system; Plastic mold.

1. TỔNG QUAN

Trong các quá trình sản xuất như ép phun nhựa và đúc kim loại, nhiệt lượng phát sinh trong giai đoạn làm đầy và đóng rắn vật liệu thường dẫn đến hiện tượng quá nhiệt cục bộ tại lòng khuôn [1]. Hiện tượng này gây ra nhiều vấn đề nghiêm trọng, bao gồm tăng nội ứng suất, biến dạng sản phẩm, và giảm tuổi thọ khuôn, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm và chi phí sản xuất [2]. Việc kiểm soát nhiệt độ khuôn một cách hiệu quả không chỉ đảm bảo tính đồng nhất của sản phẩm mà còn tối ưu hóa thời gian chu kỳ sản xuất, nâng cao hiệu suất kinh tế [3]. Các hệ thống làm mát truyền thống, sử dụng kênh thẳng hoặc khoan tròn, thường không đáp ứng được yêu cầu làm mát ở các vùng có hình dạng phức tạp, dẫn đến phân bố nhiệt không đồng đều và tích tụ nhiệt tại các điểm nóng (hot spots) [4]. Để khắc phục, hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Cooling Layer) đã được phát triển như một giải pháp tiên tiến, mang lại hiệu suất làm mát vượt trội và khả năng thích ứng với các thiết kế khuôn phức tạp [5].

Hệ thống giải nhiệt dạng lớp bao gồm các kênh làm mát hoặc lớp vật liệu dẫn nhiệt được bố trí sát bề mặt lòng khuôn, tuân theo biên dạng sản phẩm (conformal cooling) [6]. Thiết kế này cho phép truyền nhiệt nhanh chóng và đồng đều hơn so với các kênh làm mát truyền thống, đặc biệt ở các vùng có hình dạng không đều hoặc khó tiếp cận [7]. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng giải nhiệt dạng lớp có thể giảm thời gian chu kỳ ép phun từ 20-40%, đồng thời cải thiện chất lượng bề mặt sản phẩm và giảm tỷ lệ lỗi do nhiệt [8]. Việc sử dụng các vật liệu dẫn nhiệt cao, như hợp kim đồng, thép cải tiến, hoặc vật liệu composite, trong các lớp làm mát giúp tăng cường hiệu quả truyền nhiệt, đồng thời giảm thiểu nguy cơ biến dạng nhiệt và ứng

suất dư trong khuôn [9]. Sự phát triển của công nghệ in 3D kim loại đã mở ra khả năng chế tạo các kênh làm mát phức tạp, phù hợp với yêu cầu của giải nhiệt dạng lớp, từ đó nâng cao tính linh hoạt trong thiết kế khuôn [10].

Mô phỏng nhiệt độ trong lòng khuôn là một công cụ quan trọng để đánh giá và tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống giải nhiệt. Các phần mềm như ANSYS, COMSOL, hoặc Moldflow cho phép phân tích chi tiết phân bố nhiệt độ, dòng chảy chất làm mát, và ứng suất nhiệt trong khuôn [11]. Kết quả mô phỏng không chỉ giúp xác định các điểm nóng mà còn hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát trước khi chế tạo, giảm thiểu chi phí và thời gian thử nghiệm thực tế [12]. Phân tích động lực học chất lỏng (CFD) đã được ứng dụng rộng rãi để mô phỏng dòng chảy của chất làm mát trong các kênh dạng lớp, cho thấy sự cải thiện đáng kể về tính đồng nhất nhiệt độ và hiệu suất làm mát so với kênh truyền thống [13]. Một số nghiên cứu gần đây đã tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy (ML) vào mô phỏng nhiệt để dự đoán các thông số làm mát tối ưu, từ đó nâng cao độ chính xác và hiệu quả thiết kế [14].

Tại Việt Nam, việc ứng dụng giải nhiệt dạng lớp vẫn còn hạn chế do nhiều thách thức, bao gồm chi phí chế tạo cao, thiếu cơ sở hạ tầng công nghệ tiên tiến, và yêu cầu kỹ thuật phức tạp. Các doanh nghiệp sản xuất khuôn trong nước chủ yếu dựa vào các hệ thống làm mát truyền thống, dẫn đến hiệu suất thấp và khó đáp ứng các yêu cầu sản xuất hiện đại. Tuy nhiên, sự phát triển của các công nghệ chế tạo bồi đắp, đặc biệt là in 3D kim loại, đã mở ra cơ hội mới cho việc ứng dụng giải nhiệt dạng lớp tại Việt Nam. Các nghiên cứu quốc tế gần đây cũng nhấn mạnh tiềm năng của việc kết hợp giải nhiệt dạng lớp với các vật liệu tiên tiến, như hợp kim nhiệt độ cao hoặc vật liệu nano, 

để cải thiện hiệu suất làm mát và tuổi thọ khuôn. Ngoài ra, việc sử dụng các thuật toán tối ưu hóa, như thuật toán di truyền hoặc phân tích độ nhạy, trong thiết kế kênh làm mát đã giúp giảm đáng kể thời gian chu kỳ và tăng độ bền của khuôn.

Một số thách thức trong việc triển khai giải nhiệt dạng lớp bao gồm sự phức tạp trong chế tạo kênh làm mát, chi phí vật liệu, và yêu cầu về độ chính xác trong mô phỏng nhiệt. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng sai số trong mô phỏng, do dữ liệu vật liệu không chính xác hoặc giả định đơn giản hóa, có thể dẫn đến thiết kế kênh làm mát không tối ưu. Để giải quyết, các phương pháp mô phỏng đa vật lý (multiphysics) đã được đề xuất, kết hợp phân tích nhiệt, cơ học, và dòng chảy để mô tả chính xác hơn các hiện tượng trong khuôn. Ngoài ra, việc tích hợp cảm biến nhiệt độ và hệ thống điều khiển thông minh vào khuôn đã được nghiên cứu để theo dõi và điều chỉnh nhiệt độ trong thời gian thực, nâng cao hiệu quả làm mát.

Nghiên cứu này tập trung vào mô phỏng phân bố nhiệt độ của lòng khuôn dương khi sử dụng hệ thống giải nhiệt dạng lớp, nhằm đánh giá hiệu quả làm mát và khả năng kiểm soát nhiệt độ trong các điều kiện vận hành thực tế. Bằng cách phân tích dòng chảy chất làm mát, sự phân bố nhiệt độ, và các yếu tố ảnh hưởng như vật liệu khuôn và thông số làm mát, nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát, giảm thời gian chu kỳ sản xuất, và cải thiện chất lượng sản phẩm. Kết quả không chỉ góp phần cải tiến công nghệ làm mát mà còn mở ra hướng tiếp cận mới cho sản xuất khuôn tại Việt Nam, nơi các giải pháp tiên tiến như giải nhiệt dạng lớp vẫn chưa được khai thác triệt để. Nghiên cứu cũng đặt nền tảng cho việc tích hợp các công nghệ hiện đại, như AI và in 3D, vào thiết kế và vận hành khuôn, từ đó nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành công

ng nghiệp sản xuất trong nước.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong quá trình ép phun, kiểm soát nhiệt độ khuôn – đặc biệt tại vùng lòng khuôn dương – đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm và tuổi thọ khuôn. Việc tích tụ nhiệt không đều có thể gây ra các khuyết tật như cong vênh, rỗ bề mặt và biến dạng kích thước. Truyền nhiệt trong khuôn chủ yếu diễn ra qua dẫn nhiệt, được mô tả bởi phương trình truyền nhiệt không ổn định. Nhiệt lượng từ vật liệu nóng chảy truyền vào khuôn và sau đó được giải phóng ra ngoài thông qua hệ thống làm mát. Nếu hệ thống này không được thiết kế hiệu quả, nhiệt sẽ không thoát ra đồng đều, dẫn đến sự mất ổn định trong quá trình làm nguội sản phẩm. Hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Cooling Layer) là giải pháp hiện đại nhằm khắc phục hạn chế của các kênh làm mát truyền thống. Thay vì các kênh khoan thẳng, hệ thống này sử dụng các kênh làm mát được bố trí theo hình dạng tương thích với bề mặt khuôn, giúp tăng khả năng tiếp xúc và truyền nhiệt. Nhờ đó, nhiệt độ trong lòng khuôn được phân bố đồng đều hơn, rút ngắn thời gian làm mát và giảm lỗi sản phẩm.

3. MÔ PHỎNG

Thiết kế tấm insert trên khuôn dương và hệ thống giải nhiệt Cooling layer như Hình 1. Hệ thống giải nhiệt dạng lớp được thiết kế ôm theo hình dạng của tấm insert nhằm nâng cao hiệu quả giải nhiệt so với phương pháp truyền thống. Mô phỏng với thông số đầu vào Inlet (80 độ C) diễn ra trong 10 giây.



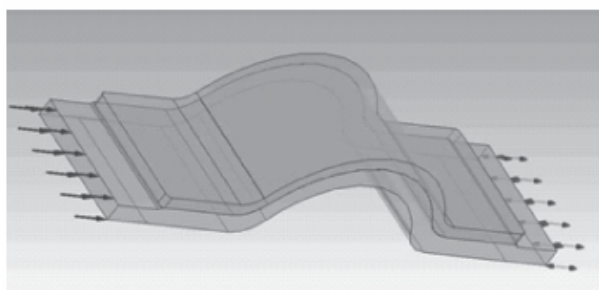
The flowchart illustrates the FEA process in two parallel tracks. The top track is in Vietnamese, and the bottom track is in English. Both tracks follow the same sequence of steps: Define problem, Create model, Create mesh, Set up analysis, Run simulation, and Post-process results. The English track includes icons for each step: a sphere for Geometry, a mesh for Mesh, a gear for Setup, a play button for Solution, and a bar chart for Results. The Ansys Research logo is centered at the bottom.

```

graph LR
    subgraph Vietnamese_Process [Quy trình phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn]
        direction LR
        A[Xác định mục tiêu mô phỏng] --> B[Thiết kế mô hình]
        B --> C[Tạo lưới]
        C --> D[Thiết lập thông số]
        D --> E[Chạy mô phỏng]
        E --> F[Phân tích kết quả]
    end

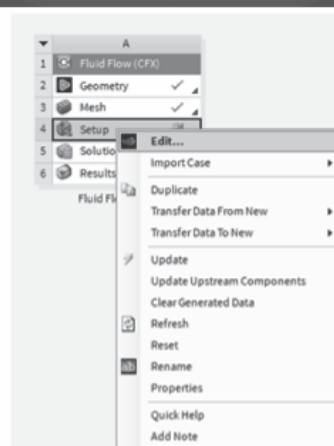
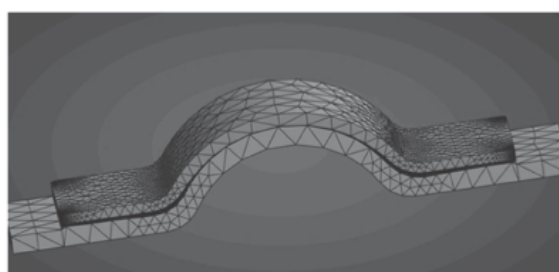
    subgraph English_Process [FEA Process]
        direction LR
        G[Geometry] --> H[Mesh]
        H --> I[Setup]
        I --> J[Solution]
        J --> K[Results]
    end

    A --- G
    B --- H
    C --- I
    D --- J
    E --- K
    F --- K
  
```



Hình 2. Thiết lập điều kiện biên cho mô phỏng

Inflection được áp dụng cho các bề mặt tiếp xúc để cải thiện độ chính xác mô phỏng. Một phần tử tứ diện được sử dụng để đại diện cho thể tích khí. Phần mềm ANSYS được sử dụng để nghiên cứu quá trình giải nhiệt khi nước đi qua thi biên dạng của tấm cooling và tái tạo điều kiện biên thí nghiệm. Với nhiệt độ ban đầu của tấm insert là 25 độ C, nhiệt độ nước đi vào (inlet) là 80 độ C, nhiệt độ nước đi ra là 25 độ C.



Hình 3. Chia lưới cho mô phỏng.

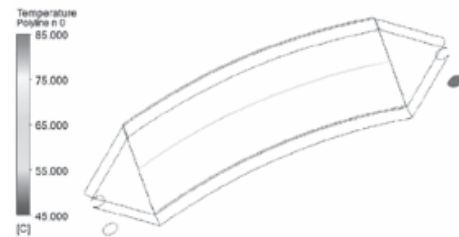
Hình 4. Biên dạng nhiệt độ thay đổi trên khuôn
dương.

Mô phỏng phân bố nhiệt độ trên khuôn dương được thực hiện để đánh giá hiệu quả của hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Conformal Cooling System - CCS), với các kênh làm mát được thiết kế ôm sát biên dạng khuôn. Sử dụng phần mềm Creo, nghiên cứu tái hiện dòng chảy chất làm mát và quá trình truyền nhiệt trong khuôn dương – bộ phận chịu tải nhiệt lớn trong quá trình ép phun nhựa. Kết quả mô phỏng, được minh họa qua Hình 4 (biên dạng nhiệt độ thay đổi), Hình 5 và Hình 6 (phân bố nhiệt độ tại tâm lòng khuôn), cho thấy CCS vượt trội so với hệ thống làm mát truyền thống sử dụng kênh khoan thẳng.

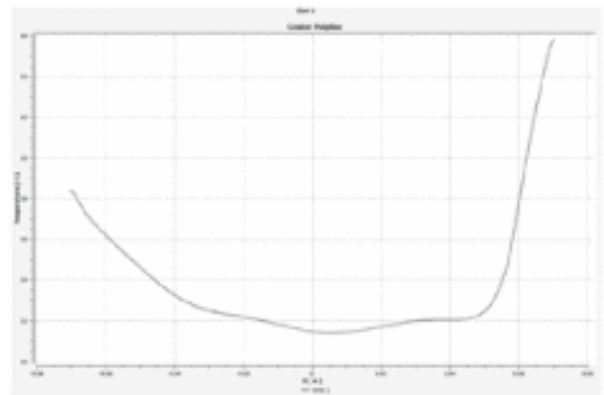
Thiết kế kênh làm mát dạng lớp giúp tối ưu hóa khoảng cách giữa kênh và bề mặt khuôn, tăng cường khả năng tiếp xúc với các vùng tích tụ nhiệt. Điều này dẫn đến sự phân bố nhiệt độ đồng đều hơn, giảm chênh lệch nhiệt độ cục bộ, và hạn chế các vấn đề như co ngót không đều, biến dạng sản phẩm, hoặc khuyết tật bề mặt. So với kênh khoan thẳng, CCS đặc biệt hiệu quả ở các khu vực có hình học phức tạp, như góc cong hoặc vùng dày, nhờ khả năng uốn cong theo biên dạng 3D của khuôn. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng thời gian làm nguội được rút ngắn đáng kể, từ đó giảm thời gian chu kỳ sản xuất, tiết kiệm năng lượng, và kéo dài tuổi thọ khuôn do giảm ứng suất nhiệt.

Cụ thể, Hình 4 cho thấy sự thay đổi nhiệt độ trên toàn bộ khuôn dương, với các vùng nhiệt độ cao được kiểm soát hiệu quả nhờ CCS. Hình 5 và Hình 6 minh họa phân bố nhiệt tại tâm lòng khuôn, nơi tải nhiệt tập trung, khẳng định khả năng làm mát đồng đều của hệ thống. Tuy nhiên, để nâng cao tính thuyết phục, mô phỏng cần được bổ sung dữ liệu thực nghiệm, chẳng hạn như phép đo nhiệt độ thực tế hoặc phân tích định lượng về hiệu suất truyền nhiệt (hệ số truyền nhiệt, lưu lượng chất làm mát).

Những dữ liệu này sẽ giúp xác thực kết quả mô phỏng và cung cấp cơ sở so sánh chi tiết hơn với các hệ thống làm mát truyền thống.



Hình 5. Phân bố nhiệt tại tâm lòng khuôn



Hình 6. Phân bố nhiệt độ tại tâm lòng khuôn

Nghiên cứu này khẳng định tiềm năng của CCS trong việc tối ưu hóa sản xuất nhựa, đặc biệt cho các khuôn có hình dạng phức tạp. Bằng cách cải thiện hiệu suất làm mát, CCS không chỉ nâng cao chất lượng sản phẩm mà còn góp phần giảm chi phí sản xuất và tăng tính cạnh tranh trong ngành công nghiệp ép phun. Trong tương lai, việc tích hợp các công nghệ mô phỏng tiên tiến, như phân tích CFD hoặc AI, có thể nâng cao độ chính xác của thiết kế kênh làm mát, mở ra cơ hội ứng dụng rộng rãi hơn trong sản xuất công nghiệp hiện đại.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu mô phỏng phân bố nhiệt độ trên khuôn dương sử dụng hệ thống giải nhiệt dạng lớp (Conformal Cooling System - CCS)

đã chứng minh tiềm năng vượt trội của phương pháp này trong việc tối ưu hóa quá trình ép phun nhựa. Kết quả mô phỏng, được thực hiện bằng phần mềm Creo, cho thấy CCS với các kênh làm mát ôm sát biên dạng khuôn mang lại sự phân bố nhiệt độ đồng đều, giảm chênh lệch nhiệt độ cục bộ và thời gian làm nguội so với hệ thống kênh khoan thẳng truyền thống. Điều này giúp hạn chế các khuyết tật sản phẩm như co ngót không đều, biến dạng, và cải thiện chất lượng bề mặt, đồng thời rút ngắn chu kỳ sản xuất, tiết kiệm năng lượng và kéo dài tuổi thọ khuôn. Đặc biệt, CCS thể hiện hiệu quả vượt trội ở các vùng có hình học phức tạp, như góc cong hoặc khu vực dày, nhờ thiết kế kênh linh hoạt theo biên dạng 3D.

Tuy nhiên, để tăng tính thuyết phục, nghiên cứu cần bổ sung dữ liệu thực nghiệm nhằm xác thực kết quả mô phỏng, bao gồm các phép đo nhiệt độ thực tế và phân tích định lượng về hiệu suất truyền nhiệt, như hệ số truyền nhiệt hoặc lưu lượng chất làm mát. Việc tích hợp các công nghệ mô phỏng tiên tiến, như phân tích động lực học chất lỏng (CFD) hoặc trí tuệ nhân tạo (AI), cũng có thể nâng cao độ chính xác và tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát trong tương lai. Kết quả nghiên cứu không chỉ khẳng định tiềm năng ứng dụng của CCS trong sản xuất nhựa mà còn mở ra hướng tiếp cận mới cho ngành công nghiệp khuôn mẫu tại Việt Nam, nơi các giải pháp làm mát tiên tiến vẫn chưa được khai thác triệt để. Nghiên cứu này đặt nền tảng cho việc phát triển các hệ thống làm mát thông minh, góp phần nâng cao hiệu suất sản xuất và chất lượng sản phẩm 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: Lê Nguyễn Liêm, Trần Ngọc Hào, Âu Thị Kim Loan, Trần Thanh Thương.

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: SV2025-338.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Mojaver, M., Azdast, T., & Hasanzadeh, R. (2021), “*Taguchi analysis on hydrogen rich syngas production via gasification of polymer wastes*”. International Journal of Hydrogen Energy, 46, 29846-29857.
- [2]. Ramakrishnan, K., Le Moigne, N., De Almeida, O., Regazzi, A., & Corn, S. (2019), “*Optimized manufacturing of thermoplastic biocomposites by fast induction-heated compression moulding*”. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 124, 105493.
- [3]. Li, Z., Wang, X., Gu, J., Ruan, S., Shen, C., Lyu, Y., & Zhao, Y. (2018), “*Topology optimization for conformal cooling in thin-wall molding based on BEM*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94, 1041-1059.
- [4]. Do, T., Uyen, T., & Minh, P. (2021), “*The feasibility of an internal gas-assisted heating method for improving the melt filling ability of polyamide 6 thermoplastic composites*”. Polymers, 13, 1004.
- [5]. Shayfull, Z., Sharif, S., Zain, A. M., Ghazali, M. F., & Saad, R. M. (2014), “*Potential of conformal cooling channels in rapid heat cycle*”

- molding*". Advances in Polymer Technology, 33, 1-24.
- [6]. Chen, S. C., Peng, H. S., Chang, J. A., & Jong, W. R. (2004), "*Simulations and verifications of induction heating on a mould plate*". International Communications in Heat and Mass Transfer, 31, 971-980.
- [7]. Gim, J., & Turng, L.-S. (2022), "*A review of current advancements in high surface quality injection molding*". Polymer Testing, 115, 107718.
- [8]. Chang, P. C., & Hwang, S. J. (2006), "*Experimental investigation of infrared rapid surface heating for injection moulding*". Journal of Applied Polymer Science, 102, 3704-3713.
- [9]. Ahmad, M. N., Ishak, M. R., Taha, M. M., Mustapha, F., Leman, Z., Lukista, D. D. A., Irianto, & Ghazali, I. (2022), "*Application of Taguchi method to FDM using oil palm fiber thermoplastics*". Polymers, 14, 2140.
- [10]. Park, H.-S., & Dang, X.-P. (2017), "*Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels*". Procedia Manufacturing, 10, 48-59.
- [11]. Li, X. P., Zhao, G. Q., Guan, Y. J., & Ma, M. X. (2009), "*Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mould*". Materials & Design, 30, 4317-4323.
- [12]. Minh, P., & Le, M.-T. (2021), "*Improving the melt flow length of ABS in thin-wall injection molding by external induction heating*". Polymers, 13, 2288.
- [13]. Nhan, P. T., Do, T. T., Anh Son, T., & Son Minh, P. (2019), "*Study on external gas-assisted mold temperature control for improving the melt flow length of thin rib products*". Advances in Polymer Technology, 2019, 5973403.
- [14]. Bui, H.-T., & Hwang, S.-J. (2015), "*Modeling a working coil coupled with magnetic flux concentrators for barrel induction heating in an injection molding machine*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 86, 16-30.

THIẾT KẾ KHUÔN PHUN ÉP CHO MẪU COMPOSITE CÓ DÙNG CARBON FIBER DẠNG TẤM

INJECTION MOLD DESIGN FOR COMPOSITE SAMPLES USING SHEET-TYPE CARBON FIBER

Phạm Anh Tú, Võ Minh Tâm*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144424@student.hcmute.edu.vn;

*tamvm@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc phát triển một thiết kế khuôn phun ép tối ưu hóa, đặc biệt cho việc sản xuất các mẫu composite gia cố bằng tấm sợi carbon. Với mục tiêu hàng đầu là đạt được chất lượng bề mặt và giảm thiểu sự xuất hiện của các khuyết tật. Để đạt được điều này, quy trình nghiên cứu sẽ bao gồm các giai đoạn sau: đầu tiên là sử dụng phần mềm mô phỏng 3D để thiết kế khuôn hai tấm có sản phẩm dạng tròn xoay ruột rỗng nên cần có lõi insert để tạo lõi rỗng và bốn lòng khuôn có kích thước lớn dần sau đó phân tích dòng chảy vật liệu và tối ưu hóa cấu trúc khuôn. Tiếp theo, một bộ khuôn hai tấm sẽ được gia công chế tạo dựa trên kết quả thiết kế và mô phỏng. Giai đoạn thử nghiệm ép phun sẽ được tiến hành, trong đó cần gắn thủ công insert vào lòng khuôn để tạo lớp nhựa thứ nhất. Tiếp đến quấn lớp sợi carbon để tạo ra sản phẩm nhựa bao quanh lớp sợi carbon. Giai đoạn kế tiếp là thay lòng khuôn lớn hơn để tạo ra sản phẩm dày hơn nhằm đạt được sản phẩm cuối cùng có bốn lớp nhựa xen kẽ với ba lớp sợi carbon. Các thông số quan trọng như nhiệt độ trục vít (nhiệt độ nhựa), áp suất phun, thời gian phun, áp suất bảo áp, thời gian bảo áp và thời gian làm mát sẽ được tinh chỉnh dựa trên mô phỏng nhằm giảm thiểu các khuyết tật thường gặp như không điền đầy, lỗ rỗng, bọt khí, hoặc biến dạng không mong muốn. Hiệu suất hoạt động của khuôn và chất lượng bề mặt của các mẫu composite được tạo ra sẽ được đánh giá một cách toàn diện bằng các phương pháp đo lường và phân tích chuyên dụng. Cuối cùng, dựa trên những kết quả thu được, nghiên cứu sẽ đưa ra các khuyến nghị cụ thể và chi tiết về thiết kế khuôn, có tính ứng dụng cao trong môi trường sản xuất công nghiệp, nâng cao chất lượng sản phẩm và giảm thiểu chi phí.

Từ khóa: Thiết kế khuôn phun ép; Sợi carbon dạng tấm; Vật liệu composite; Mô phỏng Moldex3D; Creo Parametric; Lõi ép nhựa; Mẫu thử kéo.

ABSTRACT

This study presents the development of an optimized injection mold design for the fabrication of carbon fiber-reinforced composite samples. The primary objective is to enhance surface quality and minimize common molding defects. The methodology involves the use of 3D simulation software to design a two-plate mold for a rotationally symmetrical hollow product, incorporating

a manually inserted core and four interchangeable cavities with increasing dimensions. Flow analysis and mold structure optimization are conducted to refine the design. A two-plate mold is then fabricated based on simulation results. During molding trials, the insert is manually placed to form the initial plastic layer, followed by the application of carbon fiber sheets. Subsequent molding steps involve replacing the cavity with progressively larger ones to encapsulate additional layers, resulting in a final structure comprising four plastic layers alternating with three carbon fiber layers. Process parameters such as barrel temperature, injection pressure, injection time, holding pressure, holding time, and cooling time are fine-tuned through simulation to minimize defects like short shots, voids, air bubbles, and deformation. Mold performance and composite surface quality are evaluated using specialized measurement and analysis methods. The study concludes with practical recommendations for mold design applicable in industrial manufacturing to improve product quality and reduce production costs.

Keywords: Injection mold design; Sheet-type carbon fiber; Composite materials; Moldex3D simulation; Creo Parametric; Molding defects; Tensile test specimen.

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu composite sợi carbon đã và đang trở thành một trong những vật liệu tiên tiến được ưa chuộng trong các ngành công nghiệp kỹ thuật cao như cơ khí, ô tô, hàng không vũ trụ và năng lượng tái tạo [1]. Với đặc tính nổi bật là trọng lượng nhẹ, độ cứng cao và khả năng chịu tải vượt trội, composite sợi carbon cho phép chế tạo các chi tiết kỹ thuật có hiệu suất cao, đồng thời giảm thiểu tiêu thụ năng lượng trong các ứng dụng di động [2]. So với các vật liệu truyền thống như thép hay nhôm, composite sợi carbon không chỉ mang lại lợi thế về trọng lượng mà còn cải thiện đáng kể các tính chất cơ học, bao gồm độ bền kéo, độ cứng và khả năng chống mỏi [3].

Ngoài ra, composite sợi carbon còn sở hữu khả năng chống mài mòn, chịu nhiệt và kháng hóa chất vượt trội, giúp kéo dài tuổi thọ sản phẩm và giảm chi phí bảo trì [4]. Những đặc điểm này đã thúc đẩy sự đổi mới trong thiết kế và sản xuất, từ các chi tiết máy móc nhỏ gọn đến các bộ phận lớn như khung gầm ô tô, cánh máy bay hay vỏ tàu vũ trụ [5]. Trong bối

cảnh nhu cầu về các sản phẩm hiệu năng cao và bền vững ngày càng tăng, composite sợi carbon đóng vai trò then chốt trong việc đáp ứng các tiêu chuẩn khắt khe của ngành công nghiệp hiện đại [6].

(*) Vai trò của phun ép trong sản xuất composite sợi carbon

Phun ép là một trong những phương pháp sản xuất quan trọng để tạo hình các sản phẩm composite sợi carbon, đặc biệt là các chi tiết có hình dạng phức tạp và yêu cầu độ chính xác cao [7]. Quá trình này bao gồm việc phun nhựa nhiệt dẻo hoặc nhiệt rắn vào khuôn chứa các lớp sợi carbon đã được định hình sẵn, từ đó tạo ra sản phẩm composite với cấu trúc đồng nhất và tính chất cơ học tối ưu [8]. So với các phương pháp khác như ép nóng hay đúc thủ công, phun ép mang lại hiệu quả sản xuất cao hơn, khả năng lặp lại tốt và khả năng tạo ra các sản phẩm với dung sai chặt chẽ [9].

Tuy nhiên, quá trình phun ép composite sợi carbon đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật. Một trong những vấn đề chính là đảm

bảo dòng nhựa chảy đồng đều bao quanh các lớp sợi carbon để tránh các khuyết tật như lỗ rỗng, bọt khí hay sự phân bố không đồng đều của sợi [10]. Những khuyết tật này có thể làm giảm đáng kể độ bền và tính chất cơ học của sản phẩm cuối cùng [11]. Ngoài ra, việc đạt được bề mặt sản phẩm mịn, không có các lỗi như vết cháy, biến dạng hay nứt gãy đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ các thông số phun ép, bao gồm áp suất, nhiệt độ và thời gian làm nguội [12]. Do đó, việc thiết kế khuôn phun ép phù hợp và tối ưu hóa quy trình sản xuất là yếu tố quyết định để đảm bảo chất lượng sản phẩm composite sợi carbon [13].

(*) Thách thức trong thiết kế khuôn phun ép cho composite sợi carbon

Thiết kế khuôn phun ép cho các sản phẩm composite sợi carbon dạng tấm đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng về cả khía cạnh kỹ thuật và vật liệu. Một trong những thách thức lớn nhất là đảm bảo khả năng chứa đựng các lớp sợi carbon dạng tấm trong lòng khuôn mà không làm ảnh hưởng đến quá trình phun nhựa [14]. Khuôn phải được thiết kế sao cho có thể mở rộng lòng khuôn để đặt sợi carbon một cách chính xác, đồng thời duy trì độ kín để ngăn chặn rò rỉ nhựa trong quá trình phun [1].

Ngoài ra, việc kiểm soát dòng chảy của nhựa trong khuôn là một vấn đề phức tạp, đặc biệt khi sợi carbon dạng tấm có thể cản trở sự phân bố đồng đều của nhựa [2]. Nếu dòng nhựa không được tối ưu hóa, sản phẩm có thể xuất hiện các khuyết tật như vùng thiếu nhựa, bọt khí hoặc sự phân tầng giữa nhựa và sợi [3]. Hơn nữa, các thông số vận hành như áp suất phun, tốc độ phun và nhiệt độ khuôn cần được điều chỉnh tỉ mỉ để phù hợp với tính chất của cả nhựa và sợi carbon, nhằm đạt được sản phẩm có chất lượng bề mặt và cơ tính tốt nhất [4].

Một thách thức khác là giảm thiểu các lỗi sản xuất tiềm ẩn, chẳng hạn như biến dạng nhiệt, co ngót không đồng đều hoặc ứng suất dư trong sản phẩm [5]. Những lỗi này không chỉ ảnh hưởng đến hình dạng và kích thước của sản phẩm mà còn làm giảm độ bền lâu dài của composite [6]. Do đó, việc đánh giá hiệu suất khuôn và kiểm tra chất lượng sản phẩm mẫu là cần thiết để xác định các giải pháp thiết kế và vận hành tối ưu [7].

(*) Mục tiêu và phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế một hệ thống khuôn phun ép cho sản phẩm composite sợi carbon dạng tròn xoay lõi rỗng, với mục tiêu chính là tối ưu hóa quá trình sản xuất và chất lượng sản phẩm [8]. Cụ thể, nghiên cứu sẽ tập trung vào việc mở rộng lòng khuôn để chứa các lớp sợi carbon dạng tấm, đồng thời tinh chỉnh các thông số vận hành như áp suất, nhiệt độ và thời gian phun để giảm thiểu các khuyết tật sản xuất [9].

Để đạt được mục tiêu này, hiệu suất hoạt động của khuôn sẽ được đánh giá thông qua các thí nghiệm mô phỏng và thực nghiệm, tập trung vào khả năng phân bố nhựa và độ chính xác của sản phẩm [10]. Chất lượng bề mặt của các sản phẩm mẫu cũng sẽ được kiểm tra kỹ lưỡng để xác định các lỗi như bọt khí, vết cháy hoặc biến dạng [11]. Kết quả từ các phân tích này sẽ cung cấp cơ sở để đề xuất các giải pháp thiết kế khuôn mang tính thực tiễn, phù hợp với môi trường sản xuất công nghiệp [12].

2. THIẾT KẾ BỘ KHUÔN HOÀN CHỈNH

• Mục tiêu mẫu đề ra:

Mẫu thử được thiết kế với dạng hình tròn xoay rỗng ruột, bao gồm bốn lớp nhựa xếp

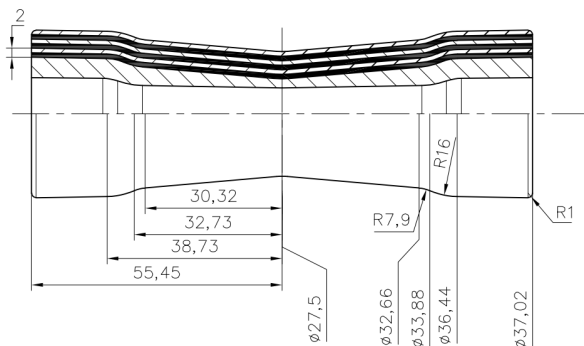
chồng lên nhau. Để tăng cường độ bền cơ học, giữa các lớp nhựa có thể được chèn thêm các lớp sợi carbon (carbon fiber).

Để đảm bảo vị trí đứt xảy ra tại vùng giữa khi chịu tải, hình dạng mẫu được thiết kế với bề dày giảm dần từ hai đầu về trung tâm, trong đó đường kính nhỏ nhất nằm tại phần giữa mẫu thử.

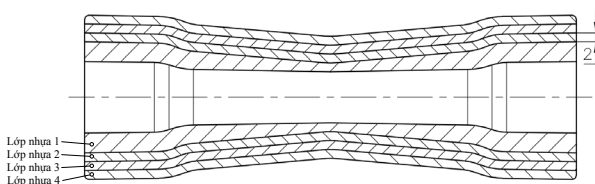
Mục tiêu nghiên cứu của mẫu thử là phục vụ thí nghiệm kéo, do đó yêu cầu mẫu phải đạt chất lượng cao với độ hoàn thiện bề mặt tốt. Điều này giúp đảm bảo tính ổn định và độ tin cậy của kết quả thử nghiệm.

• Thiết kế mẫu thử:

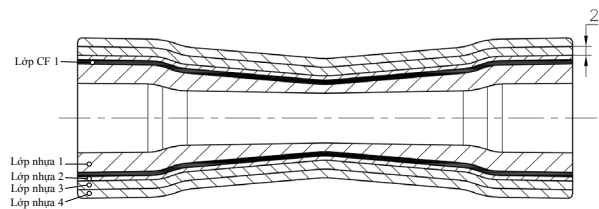
Mẫu thử được thiết kế dựa trên kích thước chiều dài theo tiêu chuẩn ISO 6892-1:2019 (Loại mẫu thử được sử dụng cho dạng ống).



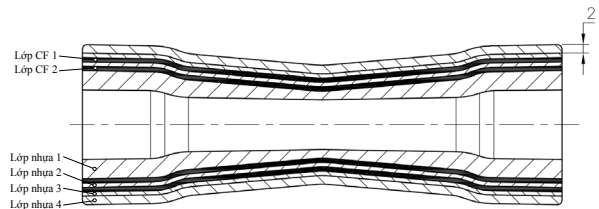
Hình 2.1. Kích thước của mẫu thử.



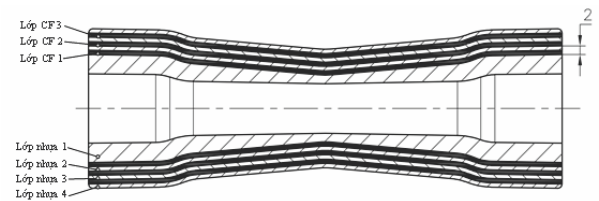
Hình 2.2. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 0 CF



Hình 2.3. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 1 CF



Hình 2.4. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 2 CF



Hình 2.5. Mặt cắt dọc của mẫu thử 4 nhựa 3 CF

• Thiết kế ô hình 3D cho khuôn:

Sau khi áp dụng các công thức tính toán để xác định các thông số cần thiết cho thiết kế khuôn, nhóm thực hiện đã sử dụng phần mềm Creo Parametric 11.0 để xây dựng mô hình 3D của khuôn.

Creo Parametric là một phần mềm CAD (Computer-Aided Design) chuyên nghiệp, được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực thiết kế kỹ thuật, bao gồm cả thiết kế khuôn ép nhựa. Phần mềm này cung cấp các công cụ mạnh mẽ cho phép xây dựng mô hình chi tiết, tối ưu hóa thiết kế và dễ dàng chỉnh sửa theo yêu cầu.

• Quy trình thiết kế khuôn bằng phần mềm Creo 11 bao gồm các bước chính như sau:

- Chuẩn bị mô hình sản phẩm: Tạo hoặc

nhập mô hình 3D sản phẩm, kiểm tra tính hoàn chỉnh và độ chính xác. Xác định hướng mở khuôn, đường và mặt phân khuôn.

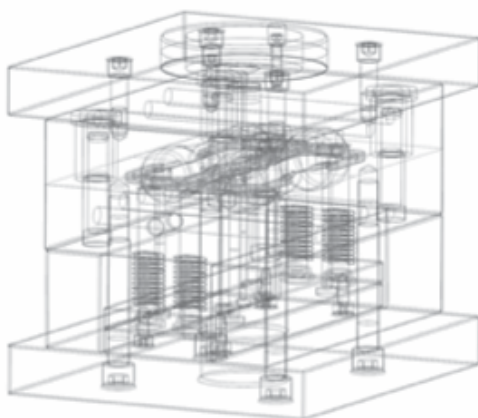
- Tách khuôn: Sử dụng Module Mold Cavity để vẽ mặt phân khuôn và tách khuôn. Thiết lập kênh dẫn nhựa, cổng phun. Tùy chỉnh các kích thước để thiết kế tấm khuôn âm và dương.

- Thiết kế vỏ khuôn: Thiết kế các tấm kẹp trên, tấm kẹp dưới, tấm đẩy, tấm giữ. Chọn các chi tiết dẫn hướng, định vị theo tiêu chuẩn.

- Thiết kế hệ thống đẩy sản phẩm: Bố trí chốt đẩy và hệ thống đẩy sản phẩm hiệu quả.

- Lắp ráp khuôn: Hoàn thiện mô hình khuôn bằng chế độ Assembly, bao gồm tất cả các thành phần.

Sau khi tính toán và dựng hình, khuôn mẫu thử được nhóm thiết kế gồm hai bộ riêng biệt, mỗi bộ gồm hai lòng khuôn. Bộ khuôn thứ nhất dùng để ép lớp thứ nhất và thứ hai, trong khi bộ khuôn thứ hai được sử dụng để ép lớp thứ ba và thứ tư. Các lớp được thiết kế với bán kính tại vị trí cần kéo đứt chênh lệch nhau 2 mm.



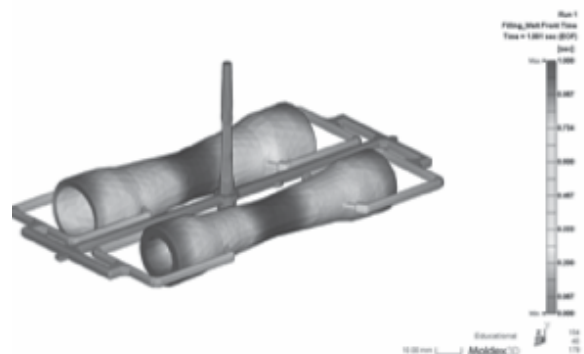
Hình 2.6. Mô hình khuôn 3D hoàn chỉnh

3. ỨNG DỤNG CAE MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH PHUN

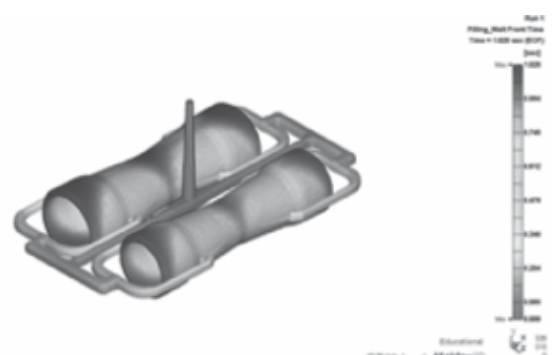
Nghiên cứu này sử dụng phần mềm Moldex3D 2024 để phân tích dòng chảy nhựa nhằm tìm ra các thông số ép phù hợp. Kiểm tra tính khả thi của thiết kế, phát hiện các vấn đề tiềm ẩn như biến dạng sản phẩm, nhiệt độ không đồng đều.

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu là nhựa PA6.

Kết quả mô phỏng cho thấy với thời gian điền đầy (Filling times) 1s, sản phẩm điền đầy hoàn toàn.



a) Lòng khuôn thứ nhất



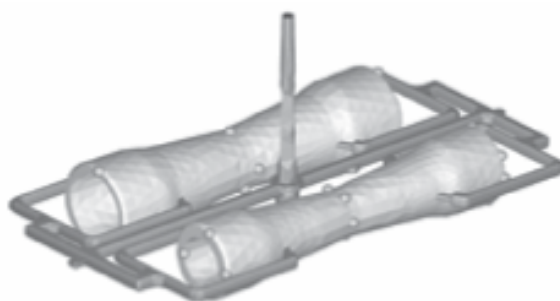
b) Lòng khuôn thứ hai

Hình 3.1. Thời gian điền đầy.

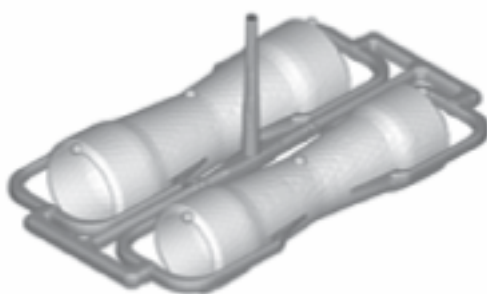
Sản phẩm xuất hiện hiện tượng bẫy khí, chủ yếu tại các vị trí không quan trọng, không

ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng tổng thể. Tuy nhiên, một số ít bẫy khí được ghi nhận tại vùng vị trí kéo đứt của mẫu thử, có thể ảnh hưởng đến tính chính xác của kết quả thí nghiệm kéo. Một số cách khắc phục mà không cần thay đổi kết cấu khuôn:

- ✓ Tăng thời gian điền đầy;
- ✓ Giảm tốc độ phun.



a) Lòng khuôn thứ nhất



b) Lòng khuôn thứ hai

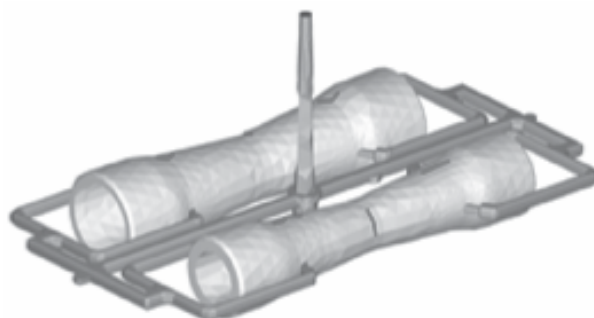
Hình 3.2. Vị trí xuất hiện bẫy khí

Kết quả mô phỏng cho thấy, đường hàn đã được phát hiện ở một số vị trí trên sản phẩm. Các đường hàn này có thể xuất hiện tại vị trí kéo, điều này có thể ảnh hưởng đến tính độ bền của sản phẩm nếu không được xử lý đúng cách.

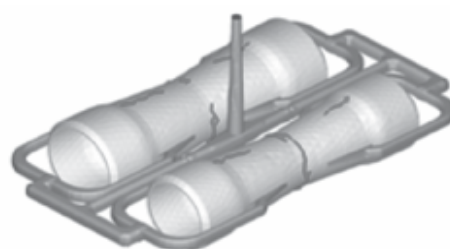
Một số cách khắc phục:

- ✓ Tăng nhiệt độ khuôn hoặc nhiệt độ nhựa nóng chảy;

- ✓ Giảm thời gian điền đầy;
- ✓ Tăng tốc độ phun.



a) Lòng khuôn thứ nhất

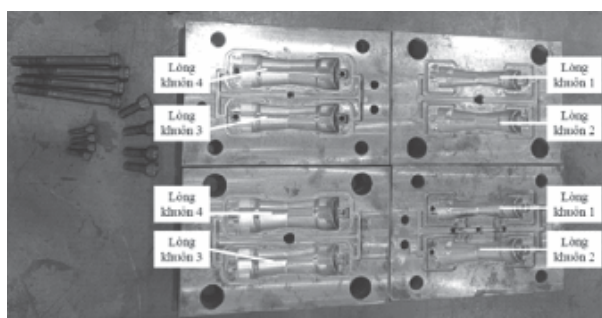


b) Lòng khuôn thứ hai

Hình 3.3. Vị trí xuất hiện đường hàn.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

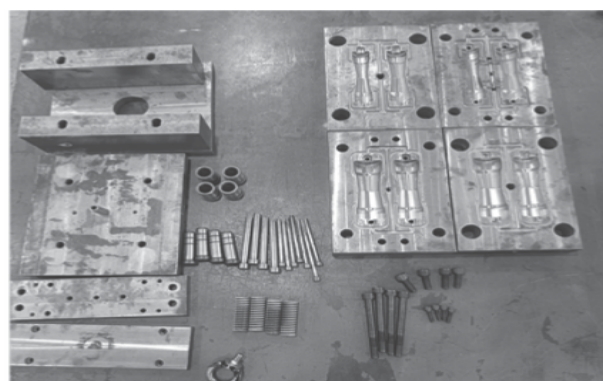
Về phần khuôn, sau quá trình gia công, khuôn đã đạt được các yêu cầu đề ra cả về mặt kỹ thuật lẫn kinh tế. Cụ thể, kích thước khuôn được gia công chính xác theo đúng bản vẽ thiết kế, đảm bảo độ phù hợp cao với chi tiết cần tạo hình (hình 1a). Bên cạnh đó, sản phẩm khuôn cũng tiệm cận với các yêu cầu thực tế trong quá trình sản xuất, cho thấy sự hợp lý trong lựa chọn vật liệu, phương pháp gia công cũng như kết cấu tổng thể (hình 1b). Ngoài ra, chi phí thực hiện khuôn nằm trong phạm vi ngân sách cho phép, cho thấy hiệu quả kinh tế được đảm bảo mà vẫn không ảnh hưởng đến chất lượng. Nhìn chung, khuôn sau khi gia công có thể sử dụng tốt trong thực tiễn sản xuất, đồng thời đáp ứng được các tiêu chí về kích thước, độ chính xác và tính kinh tế một cách hợp lý.



Hình 4.1. Hai nửa khuôn



Hình 4.3. Mẫu bị lỗi



Hình 4.2. Các chi tiết khuôn

Về phần mẫu ép, trong những lần thử nghiệm ban đầu, nhóm đã tiến hành ép theo các thông số lấy từ mô phỏng. Tuy nhiên, kết quả thu được vẫn chưa thực sự ổn định và xuất hiện một số lỗi đáng chú ý. Cụ thể, ở lớp 1 và lớp 2 (hình 2) của sản phẩm có hiện tượng không điền đầy vật liệu, dẫn đến các khuyết tật về hình dạng và kết cấu. Đồng thời, một số vị trí còn xảy ra tình trạng hở lớp và lõi sợi carbon (CF), ảnh hưởng đến chất lượng tổng thể của mẫu.

Bảng 4.1. Thông số ép ban đầu

Nhiệt độ nhựa	280°C
Áp suất điền đầy	50 Mpa
Thời gian điền đầy	1s
Áp suất bảo áp	48 Mpa
Thời gian bảo áp	5s
Thời gian làm mát	20s

Trước những vấn đề đó, nhóm đã tiến hành điều chỉnh lại các thông số ép như nhiệt độ, áp suất, thời gian giữ lực,... Qua một vài lần thử nghiệm và tinh chỉnh, các lỗi dần được khắc phục, và mẫu ép đã đạt được độ hoàn thiện tốt hơn rõ rệt ở cả bốn lớp 1, 2, 3 và 4 (hình 3). Kết quả này cho thấy việc hiệu chỉnh thông số ép đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm cuối cùng.

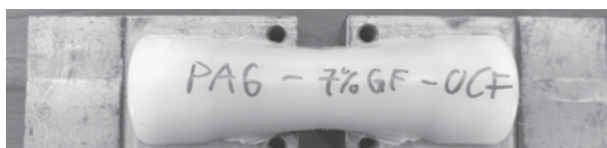
Bảng 4.2. Thông số ép đã thay đổi

Nhiệt độ nhựa	260°C
Áp suất điền đầy	70 Mpa
Thời gian điền đầy	2s
Áp suất bảo áp	65 Mpa
Thời gian bảo áp	5s
Thời gian làm mát	25s



Hình 4.4. Mẫu

Kết quả ép thử nghiệm cho thấy mẫu nhựa sau khi ép đã đạt chất lượng tốt, với việc hạn chế tối đa các khuyết tật hình học thường gặp như thiếu vật liệu (short shot), bavaria (flash), rỗ khí (voids) và hiện tượng lõi sợi carbon (CF). Điều này cho thấy quá trình điều chỉnh thông số ép đã được thực hiện hiệu quả, giúp cải thiện đáng kể chất lượng sản phẩm. Bề mặt mẫu ép đạt độ ổn định cao, không xuất hiện các vết nứt, xước hay hiện tượng xù xì, cho thấy quá trình kiểm soát nhiệt độ và áp suất trong khuôn đã được tối ưu hóa. Việc kiểm soát chặt chẽ các thông số này giúp tránh được các khuyết tật bề mặt như vết cháy, vết sần hay vết hằn từ chốt đẩy. Về độ chính xác kích thước, khu vực trung tâm của mẫu đạt gần như chính xác so với thiết kế ban đầu, với sai lệch nhỏ nằm trong giới hạn cho phép. Sai lệch này chủ yếu do hiện tượng co rút của nhựa trong quá trình làm nguội, một yếu tố thường gặp trong ép nhựa và đã được dự tính trước trong thiết kế khuôn. Đối với các lớp sợi carbon (CF), khi được quần đúng kỹ thuật và theo đúng hướng dẫn, hiện tượng lõi sợi ra ngoài bề mặt đã được giảm thiểu đáng kể. Việc sắp xếp hợp lý các lớp CF không chỉ giúp cải thiện tính thẩm mỹ mà còn đảm bảo dòng chảy của nhựa không bị cản trở, từ đó nâng cao chất lượng và độ bền của sản phẩm.



Hình 4.5. Mẫu 4 lớp nhựa 0 lớp CF

5. KẾT LUẬN

Trong quá trình thực hiện đề tài thiết kế và chế tạo khuôn ép nhựa, nhóm đã hoàn thành việc gia công khuôn đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật và kinh tế. Kích thước khuôn được gia công chính xác theo bản vẽ thiết kế, đảm bảo độ phù hợp cao với chi tiết cần tạo hình.

Sản phẩm sau khi ép thử nghiệm đạt được các yêu cầu về hình dáng và kích thước gần giống với thiết kế ban đầu. Tuy nhiên, trong quá trình ép thử, nhóm gặp phải một số khó khăn do phải thực hiện thao tác thay lòng khuôn, dẫn đến thời gian ép kéo dài. Mặc dù vậy, với kết quả đạt được, bộ khuôn vẫn có thể áp dụng hiệu quả trong học tập và nghiên cứu, đồng thời là cơ sở cho các hướng phát triển tiếp theo của đề tài.

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: SV2025-368.❖

Ngày nhận bài: **12/5/2025**

Ngày phản biện: **30/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Advani, S. G., & Sozer, E. M. (2002), “*Process modeling in composites manufacturing*”. CRC Press.
- [2]. Cysne Barbosa, A. P., Fulco, A. P. P., Guerra, E. S. S., Arakaki, F. K., Tosatto, M., Costa, M. C. B., & Melo, J. D. D. (2016), “*Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites*”. Composites Part B: Engineering, 110, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.004>
- [3]. De Cicco, D., Asaee, Z., & Taheri, F. (2017), “*Use of nanoparticles for enhancing the interlaminar properties of fiber-reinforced composites and adhesively bonded joints – A review*”. Nanomaterials, 7(11), 360. <https://doi.org/10.3390/nano7110360>
- [4]. Ding, J., & Cheng, L. (2020), “*Experimental study on ultrasonic three-point bending fatigue of CFRP under ultraviolet radiation*”. Engineering Fracture Mechanics,

- 242, 107435. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107435>
- [5]. Forintos, N., & Czigany, T. (2019), “Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review”. *Composites Part B: Engineering*, 162, 331-343. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.096>
- [6]. Goel, A., Chawla, K. K., Vaidya, U. K., Koopman, M., & Dean, D. R. (2008), “Effect of UV exposure on the microstructure and mechanical properties of long fiber thermoplastic (LFT) composites”. *Journal of Materials Science*, 43(13), 4423-4432. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2635-6>
- [7]. Iqbal, K., Khan, S. U., Munir, A., & Kim, J. K. (2009), “Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix”. *Composites Science and Technology*, 69(11-12), 1949-1957. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.04.016>
- [8]. Jaber, A. A., Obaid, A. A., Advani, S. G., & Gillespie, J. W., Jr. (2021a), “Experimental investigation of dry powder coating processing parameters on the polystyrene particle's distribution on the surface of carbon fibers”. *Powder Technology*, 393, 461-470. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.079>
- [9]. Jaber, A. A., Obaid, A. A., Advani, S. G., & Gillespie, J. W., Jr. (2021b), “Prediction of equilibrium spacing between charged polymer particles in contact with a carbon fiber”. *Journal of Electrostatics*, 111, 103577. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103577>
- [10]. Khayyam, H., Jazar, R. N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii, K., Fakhrhoseini, S. M., Kumar, S., & Naebe, M. (2020), “PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling”. *Progress in Materials Science*, 107, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100575>
- [11]. Lee, H., Huh, M., Yoon, J., Lee, D., Kim, S., & Kang, S. (2017), “Fabrication of carbon fiber SMC composites with vinyl ester resin and effect of carbon fiber content on mechanical properties”. *Carbon Letters*, 22, 101-104.
- [12]. Lewis, S. (1994), “The use of carbon fibre composites on military aircraft”. *Composites Manufacturing*, 5(2), 95-103. [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(94\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0956-7143(94)90065-5)

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA SẢN PHẨM PHUN ÉP NHỰA CÓ HỖ TRỢ NƯỚC BẰNG PHẦN MỀM MOLDEX3D

APPLICATION OF MOLDEX3D TO DETERMINE OPTIMAL PARAMETERS FOR WATER-ASSISTED INJECTION MOLDING PRODUCTS

Bành Quốc Nguyên*, Trương Phát Đạt

Bộ môn Chế tạo máy, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa,
Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: bqnguyen@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu tập trung tối ưu hóa quy trình ép phun hỗ trợ nước (WAIM) nhằm cải thiện độ đồng đều độ dày tường còn lại (RWTU), yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của sản phẩm rỗng. Mô hình mô phỏng số được xây dựng bằng Moldex3D và xác thực với dữ liệu thực nghiệm. Các thông số quá trình như nhiệt độ nhựa, khuôn, kích thước short-shot, áp suất nước, nhiệt độ nước, thời gian trễ và gia áp được phân tích bằng Thiết kế Trung tâm Tổ hợp (CCD) kết hợp Phương pháp Bề mặt Đáp ứng (RSM). Quá trình tối ưu hóa sử dụng thuật toán bầy đàn (PSO) để tối thiểu hóa độ lệch chuẩn (SD) của độ dày. Kết quả cho thấy phương pháp đã đề xuất giúp tăng độ đồng đều, tiết kiệm vật liệu và duy trì tính năng cơ học, đồng thời mang lại giá trị thực tiễn cao cho công nghiệp.

Từ khóa: Ép phun có hỗ trợ nước (WAIM); Moldex3D; Phương pháp Bề mặt Đáp ứng (RSM); Thiết kế Trung tâm Tổ hợp (CCD); Thuật toán Bầy đàn (PSO); Độ đồng đều bề dày tường còn lại (RWTU).

ABSTRACT

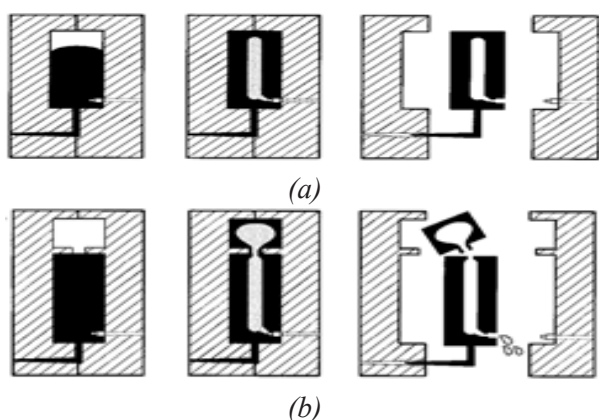
The study focuses on optimizing the Water-Assisted Injection Molding (WAIM) process to improve the uniformity of the remaining wall thickness (RWTU), a key factor affecting the mechanical properties of hollow plastic parts. A numerical simulation model was developed using Moldex3D and validated against experimental data. Process parameters such as melt temperature, mold temperature, short-shot size, water pressure, water temperature, delay time, and packing time were analyzed using Central Composite Design (CCD) combined with the Response Surface Methodology (RSM). The optimization was carried out using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to minimize the standard deviation (SD) of the wall thickness. Results showed that the proposed method significantly enhanced thickness uniformity, reduced material usage, and maintained mechanical performance, offering high practical value for industrial applications.

Keywords: Water-Assisted Injection Molding (WAIM); Moldex3D; Response Surface Methodology (RSM); Central Composite Design (CCD); Particle Swarm Optimization (PSO); Uniformity of Remaining Wall Thickness (RWTU).

1. GIỚI THIỆU

Công nghệ ép phun có hỗ trợ nước WAIM (Water-Assisted Injection Molding) [1] đã thu hút sự chú ý đáng kể trong thời gian gần đây nhờ các ưu điểm như sản phẩm nhẹ, rút ngắn chu kỳ sản xuất và mang lại sự linh hoạt trong thiết kế cũng như chế tạo các bộ phận nhựa. Quy trình này bao gồm việc bơm nhựa nóng chảy vào lòng khuôn, có thể là một phần (short-shot) như Hình 1 (a) [2] nguyên lý của quá trình ép phun ngắn hoặc toàn bộ (full-shot) như Hình 1 (b) [2] nguyên lý của quá trình ép phun đầy. Tiếp theo, chất lưu được bơm vào và ép chặt. Cuối cùng, tháo khuôn và lấy sản phẩm.

Hiện nay, các loại nhựa nhiệt dẻo tổng hợp có gia cường sợi thủy tinh ngắn (short glass-fiber reinforced thermoplastic composites) phát triển nhanh nhất và chiếm khoảng 30% thành phần nhựa tổng hợp [3]. Michaeli và cộng sự [4] đã nghiên cứu quá trình ép phun hỗ trợ nước đối với cả polypropylene và các chi tiết ống PP composite gia cường sợi thủy tinh. Họ nhận thấy thời gian làm mát cần thiết cho các PP composite ép phun hỗ trợ nước ngắn hơn so với các composite ép phun hỗ trợ khí.



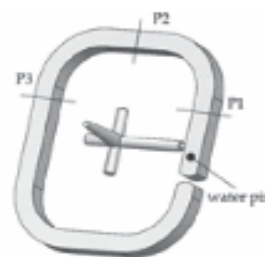
Hình 1. Sơ đồ minh họa: (a) Quy trình ép phun hỗ trợ nước ngắn (short-shot); (b) Quy trình ép phun đầy có van tràn hỗ trợ nước (full-shot with overflow) [2].

Nghiên cứu này tối ưu hóa quy trình WAIM cho vật liệu PP gia cường 20% sợi thủy tinh (PP + 20% GF) nhằm cải thiện độ đồng đều bề dày thành tường sản phẩm, với độ lệch chuẩn làm tiêu chí đánh giá chính. Các bước trong bài báo này như sau: (i) Thiết kế thực nghiệm theo phương pháp CCD (Central Composite Design) để khảo sát ảnh hưởng của các tham số quá trình; (ii) Xử lý ảnh từ mô phỏng CFD (Computational Fluid Dynamics) để tính toán độ chênh lệch bề dày; (iii) Xây dựng mô hình RSM (Re-sponse Surface Methodology) mô phỏng mối quan hệ giữa tham số đầu vào và độ dày thành; (iv) Tối ưu hóa bằng thuật toán PSO (Particle Swarm Optimization).

2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

2.1. Phát biểu bài toán

Mô hình mô phỏng sử dụng lòng khuôn dạng ống cong với mặt cắt vuông 15×15 mm như Hình 2 [1], trong đó ba vị trí đặc trưng (P1, P2, P3) được chọn để đo lường giá trị đầu ra.



Hình 2. Mô hình hình học sử dụng trong mô phỏng.

Bảy tham số công nghệ đầu vào được khảo sát gồm: Nhiệt độ nóng chảy $[220-240$ °C], nhiệt độ khuôn $[45-75$ °C], kích thước bắn ngắn $[61-71$ %], áp suất nước $[6-9$ MPa], nhiệt độ nước $[45-65$ °C], thời gian trễ $[0-3$ giây] và thời gian gia áp $[20-40$ °C].

Mục tiêu là tối thiểu hóa độ lệch chuẩn dựa của bề dày thành tường của sản phẩm để

đảm bảo thành mỏng đều, qua đó nâng cao độ chính xác hình học, tính lặp lại và độ tin cậy trong sản xuất hàng loạt.

2.2. Mô hình toán học

Để đảm bảo quá trình tính toán hội tụ và phù hợp với điều kiện ép phun thực tế, mô hình toán học giả định như sau: (i) Áp dụng điều kiện không trượt giữa dòng nhựa nóng chảy và thành khuôn; (ii) Xem nhiệt độ quá trình điền đầy nhựa là đẳng nhiệt; (iii) Bỏ qua sự sinh nhiệt nhót do ma sát nội tại trong chất lỏng gây ra bởi lực cắt. Do đó, phương trình chi phối (bảo toàn khối lượng, động lượng, năng lượng) [5] cho dòng chảy ba chiều không đẳng nhiệt như sau:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \boldsymbol{\tau}) = -\nabla \cdot \mathbf{p} + \rho \cdot \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

Trong đó: $\mathbf{u}$ = vector vận tốc, T = nhiệt độ, t = thời gian, p = áp suất, $\boldsymbol{\tau}$ = tenxơ ứng suất, $\mathbf{g}$ = vector gia tốc trọng trường, ρ = mật độ, η = độ nhót, $\mathbf{k}$ = độ dẫn điện, C_p = nhiệt dung riêng và $\dot{\gamma}$ = tốc độ cắt.

Để mô tả các tính chất lưu biến của nhựa nóng chảy trong kênh dòng chảy của khuôn, phương trình cấu thành Cross kết hợp với hàm Arrhenius [5] được lựa chọn:

$$\boldsymbol{\tau} = -\eta(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad (4)$$

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_o(T)}{1 + (\eta_o \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}}, \quad (5)$$

$$\eta_o(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (6)$$

Trong đó: n = chỉ số định luật lũy thừa, η_o = độ nhót khi không có biến dạng, τ^* = tham số mô tả vùng chuyển tiếp giữa vùng không có tốc độ biến dạng và vùng tuân theo định luật lũy thừa trên đường cong độ nhót.

2.3. Phương pháp số

Phần mềm Moldex3D được sử dụng để mô phỏng quá trình WAIM nhờ khả năng tái hiện đầy đủ các giai đoạn ép nhựa và tích hợp mô-đun WAIM với mô hình dòng chảy hai pha (nhựa – nước) [5]. Công cụ này giúp đánh giá chính xác hiện tượng rồng hóa, phân bố vật liệu, tối ưu thông số công nghệ, giảm chi phí thử nghiệm và nâng cao hiệu quả sản xuất.

2.4. Thiết kế quá trình tối ưu

Quá trình tối ưu hóa được thực hiện theo các bước được trình bày rõ ràng trong lưu đồ Hình 3. Đầu tiên, xác định các thông số quy trình và mục tiêu tối ưu, trong nghiên cứu này là giảm độ lệch chuẩn (SD) của sản phẩm ép nhựa. Bày nhân tố đầu và các mức được chọn để khảo sát như Bảng 1.

Tiếp theo, thiết kế thực nghiệm được xây dựng dựa trên thiết kế trung tâm tổ hợp (CCD) trong phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) [6], với tổng cộng 41 thí nghiệm được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến SD. Sau đó, chạy mô phỏng để thu thập dữ liệu cần thiết, từ đó xây dựng mô hình

thay thế thông qua phương trình hồi quy bội bậc hai, biểu diễn mối quan hệ giữa các biến đầu vào và độ lệch chuẩn đầu ra [6].

Khi mô hình đã được xây dựng, tiến hành đánh giá chất lượng mô hình thông qua phân tích hồi quy và ANOVA (Analysis of variance) bằng phần mềm Design-Expert 12. Nếu mô hình chưa đủ tốt, cần quay lại bước thiết kế và mô phỏng. Khi mô hình đạt yêu cầu, sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) [7] để tìm giá trị tối ưu của các tham số đầu vào. Trong nghiên cứu này, PSO được cấu hình với 10 lần chạy độc lập, 500 vòng lặp tối đa và 100 hạt trong quần thể.

Quá trình tối ưu được lặp lại cho đến khi đạt hội tụ, tức là không còn cải thiện đáng kể về kết quả. Khi hội tụ được xác nhận, ta thu được giải pháp tối ưu. Cuối cùng, xác thực kết quả được thực hiện để đảm bảo rằng điều kiện tối ưu thực sự mang lại giá trị SD nhỏ nhất như kỳ vọng.

Bảng 1. Các nhân tố và mức được lựa chọn [1].

	Mức 1	Mức 2	Mức 3
A	220	230	240
B	45	60	75
C	61	66	71
D	6	7.5	9
E	45	55	65
F	0	1.5	3
G	20	30	40

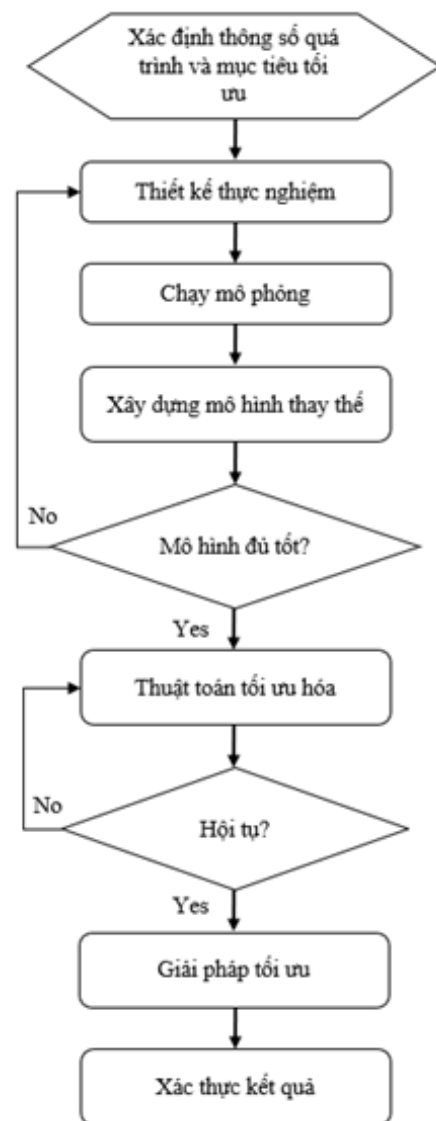
2.5. Tiêu chí đánh giá

Để đánh giá hiệu suất của mô hình trong việc dự đoán SD, hai chỉ số thống kê bao gồm căn bậc hai sai số trung bình bình phương RMSE và hệ số xác định (R^2) đã được tính toán. Các tham số thống kê này được định nghĩa như sau:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \|y(i) - \hat{y}(i)\|^2}{N}}, \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Trong đó: N = số điểm dữ liệu; $y(i)$ = giá trị đo lường thứ i ; $\hat{y}(i)$ = giá trị dự đoán thứ i ; $\bar{y}$ = giá trị trung bình của tất cả các thí nghiệm.

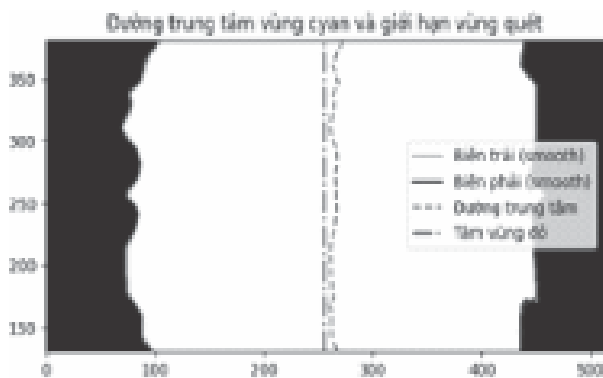


Hình 3. Lưu đồ tối ưu hóa



2.6. Tính toán độ lệch thành tường

Để tự động hóa việc đo đạc từ ảnh mô phỏng sản phẩm phức tạp, một mô hình xử lý ảnh bằng Python được xây dựng nhằm trích xuất các thông số như độ dày và độ lệch tâm (xem Hình 4).



Hình 4. Biểu diễn độ lệch bề dày thành tường.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác thực mô phỏng

Để kiểm tra độ tin cậy mô phỏng, phân tích hội tụ được thực hiện bằng cách tăng số phần tử lưới và theo dõi sự thay đổi chiều dài ngẫu nước (Penetration Length - LP). Định nghĩa về LP được giải thích rõ trong tài liệu [1]. Khi số phần tử tăng từ 847000 lên 1042000, giá trị LP gần như không đổi như Hình 5, cho thấy mô hình đã hội tụ. Tuy nhiên, thời gian tính tăng mạnh, nên lưới 847000 phần tử được chọn là tối ưu giữa độ chính xác và hiệu quả tính toán.

3.2. Kết quả tối ưu hóa

Mô hình dự đoán SD được xây dựng từ dữ liệu mô phỏng và đánh giá độ chính xác bằng hai chỉ số R^2 và RMSE. Kết quả trong Bảng 2 cho thấy mô hình có độ tin cậy cao, đủ

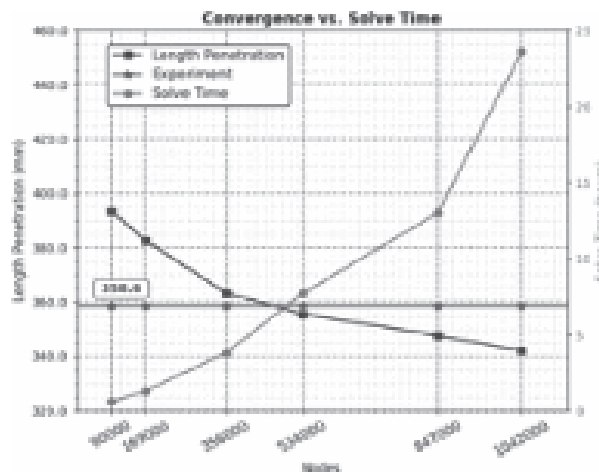
điều kiện sử dụng trong bài toán tối ưu. Một số kết quả mô phỏng theo thiết kế thực nghiệm được trình bày trong Bảng 3.

Sau khi tối ưu bằng PSO, bộ thông số đầu vào tốt nhất đã được xác định như Bảng 4. Việc kiểm chứng lại bằng mô phỏng cho thấy giá trị SD tại điểm tối ưu sai lệch dưới 10% so với dự đoán và có thể ứng dụng thực tiễn nhằm nâng cao hiệu quả thiết kế so với bộ thông số thiết kế ban đầu. Dựa trên thiết kế CCD kết hợp phân tích ANOVA, một phương trình đa thức bậc hai mô tả mối quan hệ giữa bảy thông số quá trình độc lập và SD dạng mã hóa được xác định:

$$\begin{aligned} SD = & 1.33 + 0.0346A - 0.0470C + 0.0440D - \\ & 0.0260E + 0.0247AC - 0.0478AD \\ & + 0.0442AE - 0.0889B - 0.0413CE + 0.0128C \\ & + 0.0115CG \\ & + 0.0200DF + 0.0152EF - 0.0645F + 0.1339A^2 \\ & - 0.1025B^2 \\ & + 0.1110D^2 \end{aligned}$$

Bảng 2. Các tham số thống kê của mô hình RSM

R^2	0.9078
RMSE	0.0414



Hình 5. Đồ thị kiểm tra lưới hội tụ

Bảng 3. Ma trận thí nghiệm và các kết quả tương ứng

Run	A	B	C	D	E	F	G	SD
1	230	60	66	7.5	65	1.5	30	1.2942
2	220	75	61	9	45	0	20	1.4968
3	230	60	66	9	55	1.5	30	1.5281
-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	230	60	66	7.5	55	1.5	30	1.2638
41	230	75	66	7.5	55	1.5	30	1.2692

Bảng 4. Bảng tính giá trị tối ưu và sai số giữa giá trị dự đoán và mô phỏng

Factors	A	B	C	D	E	F	G	SD		Error
	^o C	^o C	%	MPa	^o C	s	s	Optimum	Verification	%
Value	233.4	75.0	64.7	7.3	58.9	2.1	20.0	1.1492	1.2465	7.8

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này chứng minh hiệu quả của việc tích hợp Moldex3D với thiết kế thí nghiệm CCD, mô hình RSM và thuật toán PSO nhằm tối ưu độ đồng đều độ dày tường còn lại (RWTU) trong sản phẩm WAIM. Kết quả tối ưu từ PSO cho thấy SD giảm đáng kể trong khi vẫn đảm bảo điều kiện công nghệ khả thi. Ngoài ra, phương pháp xử lý ảnh tự động giúp nâng cao tốc độ và độ chính xác trong phân tích kết quả.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số SVKSTN-2024-CK-44. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 16/6/2025

Ngày phản biện: 03/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. S.-J. Liu and Y.-S. Chen, "The manufacturing of thermoplastic composite parts by water-assisted injection-molding technology". *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 35, no. 2, pp. 171-180, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2003.10.006.
- [2]. S. Liu, W. Lin, and K. Lin, "Morphological development in water assisted injection molded polyethylene/polyamide 6 blends". *Polym Adv Technol*, vol. 22, no. 12, pp. 2062-2068, Dec. 2011, doi: 10.1002/pat.1721.
- [3]. D. Hull and T. W. Clyne, "An Introduction to Composite Materials". Cambridge University Press, 1996. doi: 10.1017/CBO9781139170130.
- [4]. W. Michaeli, T. Juntgen, and A. Brunswick, "WIT – an route to series production: first industrial application of the water injection technique". *Kunststoffe Plast Europe*, vol. 91, p. 37, 2001.
- [5]. CoreTech System Co., "Release Note of Moldex3D R14.0 SPI". Taiwan, 2016.
- [6]. H. Zhou, H. Liu, T. Kuang, Q. Jiang, Z. Chen, and W. Li, "Optimization of Residual Wall Thickness Uniformity in Short-Fiber-Reinforced Composites Water-Assisted Injection Molding Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network-Genetic Algorithm". *Advances in Polymer Technology*, vol. 2020, pp. 1-10, Feb. 2020, doi: 10.1155/2020/6154694.
- [7]. P. Zhao et al., "Optimization of Injection-Molding Process Parameters for Weight Control: Converting Optimization Problem to Classification Problem". *Advances in Polymer Technology*, vol. 2020, pp. 1-9, Mar. 2020, doi: 10.1155/2020/7654249.

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO HỆ THỐNG GIÁ SÚNG MÁY 12,7 MM ĐA NĂNG KIỂU BỆ QUAY

RESEARCH, DESIGN AND FABRICATION OF A VERSATILE 12.7 MM MACHINE GUN MOUNT SYSTEM WITH A ROTATING PLATFORM

Phạm Văn Tuấn^{1,*}, Lê Thanh Bình¹, Lê Xuân Hùng¹, Trần Đức Việt², Mai Đình Sĩ¹,
Đinh Hoàng Thụy¹, Trần Văn Nhị¹, Bùi Quang Toàn³

¹Trung tâm Công nghệ, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Viện Vũ khí, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

³Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

*Email: phamtuan1501@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu, thiết kế và chế tạo hệ thống giá súng máy 12,7 mm đa năng kiểu bế quay, nhằm đáp ứng nhu cầu tích hợp trên các phương tiện cơ động cỡ nhỏ. Hệ thống được thiết kế với khả năng quay 360° góc hướng và góc tầm từ -15° đến 85° đảm bảo hiệu quả trong không gian thao tác hạn chế. Các phương pháp tính toán lý thuyết, mô phỏng số và thử nghiệm được áp dụng để đạt các chỉ tiêu kỹ thuật.

Từ khoá: Giá súng kiểu bế quay; Súng máy 12,7 mm; Phương pháp phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

This paper presents the results of the research, design, and development of a versatile 12.7 mm machine gun mount system with a rotating platform, aimed at meeting the requirements for integration onto small-scale mobile vehicles. The system is designed with a 360° azimuth rotation capability and an elevation range from -15° to 85°, ensuring operational efficiency within constrained workspaces. Theoretical calculations, numerical simulations, and experimental testing were employed to achieve the specified technical performance criteria.

Keywords: Machine gun mount; Rotating platform 12.7 mm; Finite element method.

1. MỞ ĐẦU

Súng máy 12,7 mm là một loại vũ khí tự động với hỏa lực mạnh, tính cơ động cao, được sử dụng rộng rãi để tiêu diệt hỏa lực đối phương, phương tiện bọc thép hạng nhẹ, trực thăng và máy bay bay thấp, cũng như hỗ trợ bộ binh trong các chiến dịch quân sự. Ngoài vai

trò trang bị cho bộ binh, nhu cầu tích hợp súng máy 12,7 mm lên các phương tiện cơ động cỡ nhỏ như xe tăng, pháo tự hành và xuồng cao tốc ngày càng tăng nhằm nâng cao khả năng tự bảo vệ khí tài. Tuy nhiên, khi được tích hợp trên các phương tiện này, không gian thao tác hạn chế thường dẫn đến giảm phạm vi góc hướng và góc tầm, làm suy giảm hiệu quả tiêu diệt mục

tiêu so với súng máy hoạt động trên mặt đất.

Mục tiêu của nghiên cứu là thiết kế, chế tạo một hệ thống giá súng đa năng tích hợp trên các phương tiện cơ động cỡ nhỏ nhằm tăng cường khả năng tự bảo vệ cho khí tài, đảm bảo góc hướng quay 360° và góc tầm từ -10° đến 50° .

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan về súng máy 12,7 mm và hệ thống giá súng

a. Cấu tạo và tính năng kỹ thuật của súng máy 12,7 mm

Súng máy 12,7 mm NSV sử dụng đạn cỡ 12,7x107 mm, tầm bắn hiệu quả của súng đạt 1.500 m (hỏa điểm), 800 m (mục tiêu ẩn nấp) và 1.600 m (mục tiêu trên không). Súng có khả năng bắn với tốc độ bắn 700 phát/phút, sơ tốc đầu đạn từ 820 đến 860 m/s với góc hướng $\pm 165^\circ$ và góc tầm từ -15° đến $+85^\circ$. Cấu tạo của súng máy 12,7 mm NSV bao gồm các bộ phận chính: Thân súng, giá súng, máy ngắm phòng không, hộp băng và dây băng đạn.

b. Tổng quan trong và ngoài nước

Trên thế giới, các hệ thống giá súng máy 12,7 mm đã được nghiên cứu và phát triển bởi một số hãng sản xuất như Military Systems Group (Hoa Kỳ) và Shinjeong (Hàn Quốc). Các giá súng kiểu trụ đứng truyền thống, thường được sử dụng để tích hợp súng lên các phương tiện cơ động cỡ lớn [1], [2], [3]. Tuy nhiên, khi lắp đặt trên các phương tiện cỡ nhỏ, các giá súng này bị giới hạn về góc tầm và góc hướng làm giảm phạm vi tiêu diệt mục tiêu [4]. Một số quốc gia đã phát triển giá súng kiểu bệ quay [5], đảm bảo khả năng quay 360° góc hướng và phạm vi góc tầm tối ưu, như hình 1a.



(a)



(b)

Hình 1. Một số Hệ thống giá súng 12,7 mm

Trong nước, súng máy 12,7 mm NSV được trang bị cho nhiều lực lượng vũ trang như: Bộ binh, Hải quân, Phòng không - Không quân, Cảnh sát biển.... Các đơn vị nghiên cứu như Viện Kỹ thuật Hải quân, Viện Vũ khí,... đã tiến hành nghiên cứu và thiết kế các loại giá súng để tích hợp súng máy 12,7 mm lên tàu chiến và xe chiến đấu, như hình 1b. Tuy nhiên, các hệ thống giá súng hiện tại vẫn gặp một số hạn chế, bao gồm phạm vi góc tầm và góc hướng bị thu hẹp do không gian thao tác nhỏ.

2.2. Phương pháp nghiên cứu và tính toán thiết kế

a. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo áp dụng một cách tiếp cận đa phương pháp, kết hợp các kỹ thuật lý thuyết, mô phỏng số và thực nghiệm để đảm bảo tính

khả thi và hiệu quả của hệ thống giá súng. Các phương pháp cụ thể bao gồm:

- Nghiên cứu lý thuyết: Ứng dụng các lý thuyết cơ bản như đàn hồi, cơ học vật rắn biến dạng và tính toán cơ khí để thiết kế các cơ cấu truyền động.

- Mô phỏng số: Sử dụng phần mềm Autodesk Inventor để xây dựng mô hình 3D và Ansys để thực hiện phân tích phần tử hữu hạn (FEM), tính toán tải trọng tác dụng và đánh giá ứng suất, chuyển vị của hệ thống.

- Thực nghiệm: Tiến hành chế thử và thử nghiệm sản phẩm để đánh giá các chỉ tiêu tính năng kỹ thuật trong điều kiện thực tế.

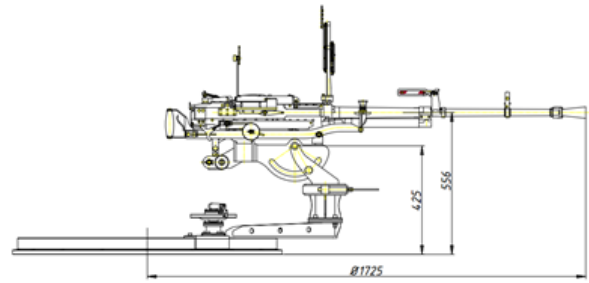
b. Thiết kế hệ thống giá súng kiểu bộ quay

Hệ thống giá súng máy 12,7 mm đa năng kiểu bộ quay được thiết kế gồm:

- Cụm mâm quay: Đảm bảo khả năng quay 360° góc hướng thông qua bộ truyền bánh răng trụ với tỷ số truyền 20 ± 5 .

- Cụm cột đỡ: Chịu toàn bộ tải trọng của hệ thống và liên kết cố định với bích lắp ghép trên phương tiện, đảm bảo độ cứng vững và ổn định.

- Cụm giá trung gian: Giá súng máy 12,7 mm NSV và điều chỉnh góc tầm từ -10° đến 50° , tích hợp các cơ cấu khóa và điều chỉnh để hỗ trợ xạ thủ...



Hình 3. Hệ thống giá súng máy 12,7 mm đa năng theo kiểu bộ quay

Các chỉ tiêu kỹ thuật của hệ thống được xây dựng dựa trên yêu cầu thực tế và tham khảo các hệ thống tương tự của nước ngoài, bao gồm:

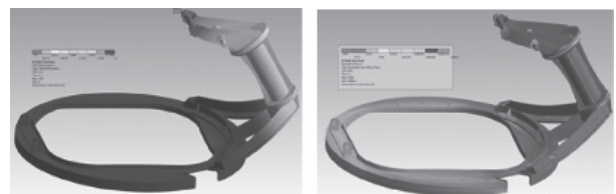
- Phạm vi góc hướng: 360° , phạm vi góc tầm: Từ -10° đến 50° .

- Tỷ số truyền góc hướng: 20 ± 5 .

- Kích thước bao tối đa: 1.500 x 1.200 x 300 mm.

c. Tính toán và mô phỏng

Tải trọng lớn nhất tác dụng lên hệ thống được xác định là 4.500 N, với hệ số tải trọng động $k_d = 2$, tương ứng với các điều kiện hoạt động. Độ bền của kết cấu được đánh giá bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên phần mềm Ansys, sử dụng thuyết bền Von Mises để tính toán ứng suất tương đương. Các trường hợp mô phỏng được thực hiện tại các góc tầm 0° , -15° , 45° , và 85° với các kết quả ở góc tầm 0° là trường hợp nguy hiểm nhất.



Hình 3. Kết quả chuyển vị và ứng suất lớn nhất lớn nhất ở góc tầm 0°

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả tính toán mô phỏng

Bảng 1. So sánh kết quả mô phỏng ở các góc tầm khác nhau

Thông số kỹ thuật	Góc tầm, độ			
	-15	0	45	85
Chuyển vị max (mm)	6,79	7,01	5,93	0,83
Ứng suất max (MPa)	311,6	334,4	271,2	217,4
Hệ số an toàn min	1,3	1,2	1,8	2,4

Chuyển vị lớn nhất 7,01 mm và ứng suất lớn nhất 334 Mpa ở góc tầm 0°.

3.2. Kết quả thử nghiệm các chỉ tiêu tính năng

- Kết quả thử nghiệm khả năng chịu tải.

Bảng 2. Kết quả kiểm tra khả năng chịu tải

TT	Tên chỉ tiêu	Giá trị (kg)	Yêu cầu (kg)	Đánh giá
1	Khả năng chịu tải tĩnh	55	$\geq 52,5$	Đạt
2	Khả năng chịu tải động	45	$\geq 43,75$	Đạt

- Kết quả thử nghiệm phạm vi hoạt động.

Bảng 3. Kết quả kiểm tra phạm vi hoạt động

TT	Tên chỉ tiêu	Giá trị (độ)	Yêu cầu (độ)	Đánh giá
1	Phạm vi hoạt động góc hướng	> 360	≥ 360	Đạt
2	Phạm vi hoạt động góc tầm	-15 đến 85	Từ -10 đến 50	Đạt

Kết quả nghiên cứu và chế tạo hệ thống giá súng máy 12,7 mm đa năng kiểu bộ quay cho thấy một số điểm nổi bật. Thứ nhất, hệ thống đã khắc phục được các hạn chế của giá súng kiểu trụ đứng truyền thống, đặc biệt là khả năng quay 360° góc hướng và phạm vi góc tầm rộng phù hợp với không gian thao tác hạn chế trên các phương tiện cỡ nhỏ. Thứ hai, việc áp dụng các phương pháp mô phỏng FEM đảm bảo độ bền của kết cấu, với ứng suất và chuyển vị nằm trong giới hạn an toàn.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra với phương án thiết kế hệ thống giá súng máy 12,7 mm đa năng kiểu bộ quay đảm bảo độ bền trong các trường hợp tải trọng ở các góc tầm, góc hướng nguy hiểm. Sản phẩm được thử nghiệm đáp ứng các chỉ tiêu kỹ thuật đề ra. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, dễ sử dụng và phù hợp với các phương tiện cơ động cỡ nhỏ nhằm góp phần nâng cao khả năng tự bảo vệ cho bộ đội và khí tài. ♦

Ngày nhận bài: 16/6/2025

Ngày phản biện: 23/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Aleksandar Kari, Dušan Jovanović, et al., “Stress Analysis of Integrated 12,7 mm Machine Gun Mount”. Scientific Technical Review, 2016.
- [2]. Jovanovic, D., “Integration of Machine Gun 12,7 Millimeters on Mobile Platform”. Serbia, 2015.
- [3]. Ristic, Z., “Mechanic of Artillery Weapons”. Odbrana Media Center, Belgrade, Serbia, 2016.
- [4]. Nguyễn Văn Hùng, Nguyễn Chí Thành, Nguyễn Văn Xuất, “Nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ giá điều khiển đa năng cho súng 12,7 mm và 14,5 mm tự động bám ảnh mục tiêu”. Hội nghị toàn quốc lần thứ 3 về Điều khiển và Tự động hóa - VCCA-2015.
- [5]. <https://milsysgroup.com/all-products/>

TỔNG QUAN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ NANO TRONG DỆT MAY

OVERVIEW APPLICATIONS NANOTECHNOLOGY IN TEXTILE

ThS. Nguyễn Thị Thu Hương

Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: thuhuong@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Công nghệ nano đã cách mạng hóa nhiều ngành công nghiệp khác nhau và ngành dệt may cũng không ngoại lệ. Việc tích hợp công nghệ nano vào hàng dệt may đã mở ra vô số cơ hội để nâng cao các đặc tính của vải. Công nghệ nano đã được sử dụng để mang lại nhiều đặc tính mong muốn cho vải dệt như kháng khuẩn, chống thấm nước, tự làm sạch, không nhăn. Bài báo này nhằm mục đích đánh giá các ứng dụng của công nghệ nano trong ngành dệt may và làm nổi bật những lợi ích tiềm năng của nó trong nhiều quy trình dệt may khác nhau như tráng phủ, in, nhuộm, hoàn thiện, sửa đổi bề mặt. Ngoài ra, bài báo này đi sâu vào vai trò của các cấu trúc nano khác nhau như sợi nano, nanocomposite và nanocoatings. Đã phát triển hàng dệt may thông minh, quần áo bảo hộ và các sản phẩm dệt may bền vững khác. Những thách thức, triển vọng tương lai và ý nghĩa sinh học của công nghệ nano trong hàng dệt may cũng được thảo luận, nhấn mạnh nhu cầu tiếp tục nghiên cứu và đổi mới trong lĩnh vực này.

Từ khóa: Lớp phủ nano; Vải thông minh; Tự làm sạch; Chống bẩn; Lớp phủ kháng khuẩn.

ABSTRACT

Nanotechnology has revolutionized various industries, and the textile industry is no exception. The integration of nanotechnology into textiles has opened up a plethora of opportunities to enhance the properties of fabrics. Nanotechnology has been employed to impart various desirable properties to textile fabric such as anti-bacterial, water-repellent, self-cleaning, wrinkle free, etc. This review paper aims to explore the applications of nanotechnology in the textile industry, and highlight its potential benefits in various textile processes such as coating, printing, dyeing, finishing, surface modifications, etc. Additionally, this paper delves into the role of different nanostructures like nanofibers, nanocomposites, and nanocoatings, etc. which have enabled the development of smart textiles, protective clothing, and other sustainable textile products. The challenges, future prospects, and biological implications of nanotechnology in textiles are also discussed, emphasizing the need for continued research and innovation in this field.

Keywords: Nanocoating; Smart textile; Self-Cleaning; Stain resistant; Antimicrobial coating.

1. CÔNG NGHỆ NANO TRONG HÀNG DỆT MAY THỜI TRANG HIỆN NAY

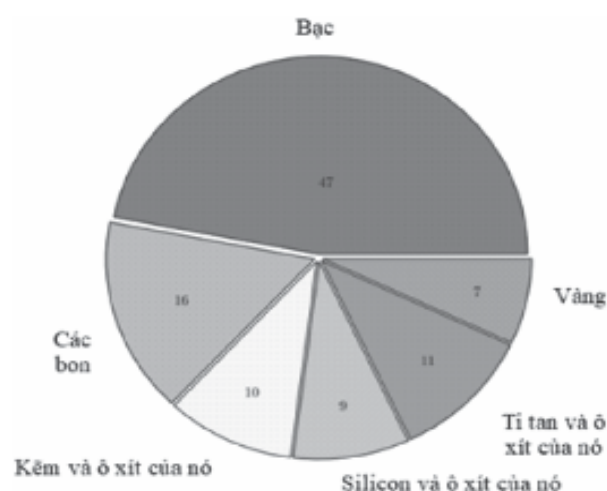
Thị trường hàng dệt may thông minh và đa chức năng đang tăng lên từng ngày. Nghiên cứu này nhằm mục đích giới thiệu các ứng dụng và lợi ích đa dạng của công nghệ nano trong hàng dệt may. Một số minh chứng về hàng dệt may chức năng hiệu suất cao được tạo ra bằng công nghệ nano bao gồm hàng dệt may, y tế và chăm sóc sức khỏe, quần áo thích ứng với nhiệt độ, đồ lót không mùi. Ngoài ra, bài báo này tìm cách giải quyết các thách thức như mối quan tâm về sức khỏe và an toàn, khả năng mở rộng, hiệu quả về chi phí, các vấn đề về quy định và tác động môi trường, liên quan đến việc tích hợp công nghệ nano vào hàng dệt may.

Công nghệ nano liên quan đến việc thao tác và sử dụng các vật liệu ở phạm vi nano từ 1-100 nanomet. Các hạt nano có thể thể hiện các đặc tính khác với vật liệu khối ban đầu [1]. Một trong những lý do chính cho điều này là tỷ lệ diện tích bề mặt trên thể tích cao trong các hạt nano, cho phép tương tác nhiều hơn với môi trường xung quanh. Việc tích hợp công nghệ nano vào hàng dệt may có tầm quan trọng và ý nghĩa to lớn do tiềm năng cách mạng hóa ngành dệt may của nó. Các hạt nano được thiết kế với các đặc tính bề mặt thay đổi được sử dụng trong ngành dệt may. Các hạt nano bao gồm silica, fullerene, ống nano carbon, vàng, bạc, oxit sắt, titan dioxide, oxit kẽm [2-4]. Công nghệ nano trong hàng dệt may được sử dụng để tăng cường các đặc tính, sự thoải mái và chức năng của hàng dệt may. Ngày nay, vật liệu nano ngày càng được sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau, từ thể thao và chăm sóc sức khỏe đến hàng không vũ trụ và thời trang. Vật liệu nano, hạt nano, sợi nano và nanocomposite tích hợp vào hàng dệt may mang lại những cải tiến đáng kể về chất lượng của các sản phẩm dệt may.

Công nghệ nano cũng đóng vai trò quan trọng trong việc giải quyết những thách thức mới nổi trong ngành dệt may, như nhu cầu về vật liệu và quy trình bền vững và thân thiện với môi trường. Bằng cách kết hợp vật liệu nano, ngành dệt may có thể phát triển các sản phẩm sáng tạo đáp ứng nhu cầu ngày càng thay đổi của người tiêu dùng, hàng dệt thông minh cho công nghệ có thể mặc, vải bảo vệ cho các ứng dụng an toàn và hàng dệt bền vững cho tương lai xanh hơn. Tầm quan trọng của công nghệ nano nằm ở khả năng đóng góp vào những tiến bộ trong các lĩnh vực khác nhau của nó bằng cách phá vỡ ranh giới của khoa học dệt may, đổi mới và khả năng cạnh tranh trên thị trường.

2. VẬT LIỆU NANO ĐƯỢC SỬ DỤNG PHỔ BIẾN TRONG DỆT MAY

Các nguyên tố và hợp chất được sử dụng phổ biến nhất để sản xuất vật liệu nano bao gồm: Bạc; Cacbon; Titan và oxit của nó; Kẽm và oxit của nó; Silicon và oxit của nó. Hình 1 minh họa bạc là hạt nano được sử dụng rộng rãi nhất trong các ứng dụng công nghiệp.



Hình 1. Tỷ lệ vật liệu nano được ứng dụng trong công nghiệp hiện nay

Nanoclay là silicat khoáng có lớp

2D với lớp dày 1 nm và có tính chất cơ học rất cao. Nanoclay có thể được kết hợp vào sợi dệt và lớp phủ để cải thiện tính chất rào cản, khả năng chống cháy và độ bền cơ học [3]. Montmorillonite và kaolinite là hai loại nanoclay thường được sử dụng trong ứng dụng dệt may. Nanoclay được sản xuất thông qua một quy trình bao gồm khai thác, tinh chế, giãn nở giữa các lớp và tách lớp. Xử lý chất hoạt động bề mặt cải thiện khả năng tương thích và các nanoclay thu được được sấy khô, xay.

Sản xuất nanocomposite liên quan đến việc kết hợp vật liệu gia cố ở cấp độ nano, chẳng hạn như hạt nano hoặc nanoclays, vào vật liệu nền, thường là polyme. Trong hàng dệt may, nanocomposite có thể cải thiện các đặc tính như độ bền kéo, khả năng chống mài mòn và khả năng chống cháy [4].

Sợi nano là sợi siêu mịn có đường kính trong phạm vi nanomet. Chúng thường được sử dụng trong hàng dệt may cho các ứng dụng như lọc, băng vết thương, kỹ thuật mô, quần áo bảo hộ, cảm biến, thiết bị lưu trữ năng lượng và hàng dệt may thông minh. Kéo sợi điện là một kỹ thuật phổ biến để sản xuất sợi nano. Kỹ thuật này bao gồm việc áp dụng một trường điện vào dung dịch polyme hoặc chất nóng chảy, tạo ra sợi siêu mịn có tỷ lệ diện tích bề mặt trên thể tích cao và các chức năng độc đáo. Sử dụng quy trình kéo sợi điện, sợi nano của CNT nhiều lớp (MWCNT) có thể được sản xuất bằng cách đồng thời giảm đường kính sợi và tăng độ xoắn (lên đến 1000 lần) [5].

Nanocoatings có thể được áp dụng cho hàng dệt may để tăng cường các đặc tính như khả năng chống thấm nước, chống ố và chống tia UV [6]. Các lớp phủ này thường sử dụng các hạt nano hoặc polyme ở cấp độ nano.

Các loại mực dung môi và UV thông

thường được nhuộm bằng bột có đường kính khoảng 1000nm hoặc lớn hơn, trong khi nanopigments sử dụng các sắc tố (bột) có đường kính không lớn hơn 100nm. Nanopigments thể hiện cường độ màu và độ ổn định cao [7]. Chúng có thể được sử dụng trong hàng dệt may để đạt được màu sắc rực rỡ và lâu dài, cũng như để bảo vệ khỏi tia UV và có đặc tính tự làm sạch.

Ống nano cacbon (CNT) có thể được tích hợp vào hàng dệt may để tăng cường độ dẫn điện và độ bền cơ học [8].

Nanodiamonds là các hạt kim cương có kích thước trong phạm vi nano, thường có kích thước từ vài đến vài trăm nanomet. Việc sử dụng nanodiamonds trong hàng dệt may làm nâng cao hiệu suất và chức năng của vải. Nanodiamonds có độ dẫn nhiệt cao và độ cứng đặc biệt [9].

Tinh thể nano là tinh thể có kích thước nano của nhiều vật liệu khác nhau. Những tinh thể này có thể bao gồm kim loại, chất bán dẫn, gốm sứ hoặc hợp chất hữu cơ. Kích thước và tính chất độc đáo của chúng khiến chúng có giá trị trong nhiều ứng dụng, từ điện tử đến y học [10]. Tinh thể nano được tạo ra bằng cách phân hủy chitosan thành kích thước nhỏ hơn, thường trong phạm vi nanomet.

3. ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ NANO TRONG NGÀNH DỆT MAY

Joshi và cộng sự đã đề xuất các kỹ thuật đặc tính cho các ứng dụng công nghệ nano trong hàng dệt [11]. Việc kiểm soát chính xác kích thước, hình dạng, sự phân tán và lắng đọng của vật liệu nano trên chất nền dệt cần có các kỹ thuật đặc tính tinh vi. Các kỹ thuật đặc tính được sử dụng phổ biến nhất là máy phân

tích kích thước hạt, kính hiển vi điện tử (SEM/TEM), kính hiển vi lực nguyên tử, nhiễu xạ tia X.

Mahmud và Nabi đề xuất ứng dụng công nghệ nano trong lĩnh vực dệt may [12]. Nghiên cứu đã chỉ ra công nghệ nano được sử dụng trong ngành dệt may để tạo ra hàng dệt may thông minh.

Singh cung cấp tổng quan về các sáng kiến công nghệ nano, các ứng dụng công nghiệp của chúng và các bằng sáng chế liên quan [13]. Tác giả thảo luận về các ứng dụng công nghệ nano chính như điện tử nano, y học nano, xúc tác nano và cảm biến nano, đồng thời nêu bật tiềm năng của chúng trong việc giải quyết các thách thức toàn cầu.

Asif và Hasan đã đề xuất về ứng dụng công nghệ nano trong dệt may hiện đại [14]. Nghiên cứu làm nổi bật tiềm năng của công nghệ nano trong việc tạo ra các loại vải dệt sáng tạo và hiệu suất cao trong khi giải quyết các đặc tính thông thường được giải quyết là quản lý độ ẩm, đặc tính kháng khuẩn, bảo vệ tia UV và khả năng tự làm sạch.

Malik, Muhammad và Waheed đã đề xuất công nghệ nano. Một cuộc cách mạng trong ngành công nghiệp hiện đại [15]. Trong nghiên cứu này, các tác giả khám phá tác động chuyển đổi của công nghệ nano đối với nhiều ngành công nghiệp khác nhau, nêu bật cách công nghệ nano đã cách mạng hóa các lĩnh vực như y học, điện tử, năng lượng và khoa học vật liệu.

Krifa và Prichard cung cấp một tổng quan toàn diện về ứng dụng công nghệ nano trong ngành dệt và may mặc [16]. Nghiên cứu bao gồm nhiều loại vật liệu nano khác nhau

như nanocoating, nanocomposite, hoàn thiện nano và nanosensor. Nêu bật tác động của công nghệ nano đối với việc phát triển các sản phẩm dệt may để kiểm soát độ ẩm, độ bền, sự thoải mái và khả năng bảo vệ tốt hơn trong hàng dệt may và may mặc.

4. ĐÁNH GIÁ CÁC MỐI NGUY HẠI TIỀM ẨN ĐỐI VỚI SỨC KHỎE CỦA CÔNG NGHỆ NANO TRONG NGÀNH DỆT MAY

Vật liệu nano đang ngày càng hiện diện nhiều hơn trong nhiều sản phẩm dệt. Có nhiều lo ngại về các vấn đề độc tính khi xử lý nhiều loại hạt nano khác nhau. Một số tác giả đã tiến hành nghiên cứu về tác động có hại của công nghệ nano đối với các hệ thống sinh học. Vì hầu hết các mối nguy hại tiềm ẩn của vật liệu nano đối với các hệ thống sinh học vẫn còn ẩn và chưa được tiết lộ, các tác giả đề xuất nên theo dõi và giám sát chặt chẽ.

Saleem và cộng sự, nêu bật những mối nguy hiểm tiềm tàng của vật liệu nano trong hàng dệt may và nhấn mạnh nhu cầu cần có các quy định tốt hơn về xử lý chất thải [17]. Chen thảo luận về sự cần thiết của việc đánh giá rủi ro đối với hàng dệt may phủ nano và tầm quan trọng của các quy định có trách nhiệm để đảm bảo phát triển an toàn [18]. Almeida và cộng sự tập trung vào việc giải phóng các hạt nano từ vải nano và khả năng tiếp xúc qua tiếp xúc với da [19]. Yetisen và cộng sự thảo luận về việc tích hợp vật liệu nano vào hàng dệt may và đánh giá các yếu tố rủi ro như độc tính nano và tác động đến môi trường [20].

5. TRIỂN VỌNG ỨNG DỤNG NANO TRONG NGÀNH DỆT MAY

Mối quan ngại về sức khỏe và an toàn: Việc tích hợp công nghệ nano vào hàng dệt 

may mang lại những lợi thế nhưng cũng làm dấy lên mối quan ngại về sức khỏe và an toàn. Các hạt nano thoát ra từ hàng dệt may trong quá trình sản xuất, sử dụng và thải bỏ có thể gây ra các nguy hại khi hít và nuốt phải. Các giới hạn và quy định về phơi nhiễm nghề nghiệp cụ thể đối với vật liệu nano trong ngành dệt may đang được xây dựng.

Khả năng mở rộng và tiết kiệm về chi phí: Là những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến việc áp dụng rộng rãi công nghệ nano trong ngành dệt may và tích hợp chúng vào các quy trình sản xuất hàng dệt may. Những thách thức nảy sinh trong việc sản xuất vật liệu nano với số lượng lớn mà không ảnh hưởng đến chất lượng và quản lý chi phí cạnh tranh trên thị trường. Mặc dù hiện nay, khoản đầu tư ban đầu lớn hơn vào sản xuất hàng dệt may dựa trên công nghệ nano, nhưng những tiến bộ trong kỹ thuật sản xuất và nhu cầu tăng có thể dẫn đến việc giảm chi phí trong thời gian tới.

Quy định và tiêu chuẩn hóa: Việc tích hợp công nghệ nano vào hàng dệt may đặt ra những thách thức về quy định và tiêu chuẩn hóa, do thiếu các hướng dẫn và tiêu chuẩn cụ thể cho vật liệu nano. Các quy định hiện hành không giải quyết thỏa đáng các đặc tính và rủi ro liên quan đến công nghệ nano trong hàng dệt may. Do đó, phát sinh những khó khăn trong việc đánh giá rủi ro, thử nghiệm an toàn và bảo vệ người tiêu dùng liên quan đến ngành công nghiệp dệt may dựa trên công nghệ nano. Sự hợp tác giữa các cơ quan quản lý, các tổ chức tiêu chuẩn hóa, các nhà nghiên cứu và các bên liên quan trong ngành là rất quan trọng để thu hẹp khoảng cách giữa nghiên cứu và hoạch định chính sách. Tính minh bạch, chia sẻ thông tin và cách tiếp cận dựa trên rủi ro là điều cần thiết để thúc đẩy sự đổi mới đồng thời đảm bảo việc sử dụng công nghệ nano trong hàng dệt

may một cách an toàn và có trách nhiệm. Tuy nhiên, hiện nay các nỗ lực đang được tiến hành để hoàn thiện các vấn đề về quy định và tiêu chuẩn hóa này.

Tích hợp công nghệ nano với các công nghệ khác: Việc tích hợp thành công công nghệ nano với các công nghệ khác là yếu tố then chốt để khai thác toàn bộ tiềm năng của công nghệ nano trong ngành dệt may. Bằng cách kết hợp công nghệ nano với các lĩnh vực như công nghệ sinh học, điện tử và khoa học vật liệu, có thể phát triển các ứng dụng dệt may sáng tạo và đa chức năng. Các nỗ lực nghiên cứu liên ngành là cần thiết để khám phá khả năng tích hợp công nghệ nano với các công nghệ khác, cho phép phát triển các sản phẩm dệt may tiên tiến và phong phú.

Tác động môi trường và tính bền vững: Mặc dù công nghệ nano mang lại những tiến bộ đáng kể về chức năng và hiệu suất của hàng dệt may, nhưng điều quan trọng là phải xem xét tác động môi trường và đảm bảo tính bền vững trong ứng dụng. Việc sản xuất và thải bỏ vật liệu nano, cũng như việc giải phóng các hạt nano trong suốt vòng đời của hàng dệt may ứng dụng công nghệ nano, làm dấy lên mối lo ngại về dấu chân sinh thái của chúng. Để giải quyết những mối lo ngại này, nghiên cứu tập trung vào việc phát triển các phương pháp tổng hợp thân thiện với môi trường, giảm việc sử dụng các hóa chất nguy hiểm và tối ưu hóa quy trình sản xuất để giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng và phát sinh chất thải. Việc tích hợp với các vật liệu bền vững, như polyme phân hủy sinh học, tài nguyên tái tạo và các thành phần có thể tái chế, góp phần hơn nữa vào tính bền vững về môi trường của công nghệ nano trong hàng dệt may. Nhấn mạnh vào việc đánh giá vòng đời và áp dụng phương pháp tiếp cận kinh tế tuần hoàn, ngành dệt may mục đích là cân bằng lợi

ích của công nghệ nano với giảm thiểu tác động đến môi trường, đảm bảo việc triển khai công nghệ nano trong dệt may một cách bền vững và hiệu quả.

6. KẾT LUẬN

Bài báo này đã nêu bật những ứng dụng đa dạng của công nghệ nano trong hàng dệt may, đã nêu lên được tiềm năng to lớn của vật liệu nano trong việc nâng cao các đặc tính chức năng của vải. Hơn nữa, sự tích hợp của công nghệ nano đã dẫn đến sự phát triển của hàng dệt may dẫn điện và cảm biến, các giải pháp thu thập và lưu trữ năng lượng, và thiết bị điện tử đeo được. Công nghệ nano cũng đóng vai trò trong việc tạo ra lớp phủ siêu kỵ nước và siêu kỵ dầu, hàng dệt may thoáng khí và không thấm nước, cũng như vật liệu cách nhiệt và thay đổi pha. Nghiên cứu này nhấn mạnh những đóng góp quan trọng của công nghệ nano trong việc chuyển đổi ngành dệt may. Từ đó cũng đưa ra được những lo ngại về các rủi ro tiềm ẩn và các vấn đề pháp lý liên quan đến sản xuất, sử dụng và thải bỏ vật liệu nano được sử dụng trong hàng dệt may. Nghiên cứu này nhằm mục đích phục vụ như một nguồn tài nguyên có giá trị cho các nhà nghiên cứu, kỹ sư dệt may và các chuyên gia trong ngành quan tâm đến việc khám phá tiềm năng to lớn của công nghệ nano để nâng cao các đặc tính, chức năng và tính bền vững của hàng dệt may. Kết quả từ nghiên cứu này có thể truyền cảm hứng cho nghiên cứu và đổi mới hơn nữa, thúc đẩy sự phát triển trong tương lai của các sản phẩm và vật liệu dệt may tiên tiến. ❖

Ngày nhận bài: 18/6/2025

Ngày phản biện: 07/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. R. Mishra, J. Militky, V. Baheti, J. Huang, B. Kale, M. Venkataraman, V. Bele, V. Arumugam, G. Zhu, Y. Wang, “*The production, characterization and applications of nanoparticles in the textile industry*”. Textile Progress, 2014, 46, 133-226, doi: 10.1080/00405167.2014.964474.
- [2]. I. Ahmad, A. Ahmad, H. Tabassum, M. Kuddus, “*A cosmeceutical perspective of engineered nanoparticles*”. Handbook of Nanomaterials for Manufacturing Applications, 2020, 191-223, doi: 10.1016/b978-0-12-821381-0.00008-9.
- [3]. İ. Göcek, “*Functionalization of textile materials with nanoclay incorporation for improved characteristics*”. Politeknik Dergisi, 2019, 22, 509-522, doi: 10.2339/politeknik.508592.
- [4]. S. Gowri, L. Almeida, T. Amorim, N. Carneiro, A. Pedro Souto, M. Fátima Esteves, “*Polymer nanocomposites for multifunctional finishing of textiles - A review*”. Textile Research Journal, 2010, 80, 1290-1306, doi: 10.1177/0040517509357652.
- [5]. A. P. S. Sawhney, B. Condon, K. V. Singh, S. S. Pang, G. Li, D. Hui, “*Modern applications of nanotechnology in textiles*”. Textile Research Journal, 2008, 78, 731-739, doi: 10.1177/0040517508091066.
- [6]. A. Yadav, V. Prasad, A. A. Kathe, S. Raj, D. Yadav, C. Sundaramoorthy, N. Vigneshwaran, “*Functional finishing in cotton fabrics using zinc oxide nanoparticles*”. Bulletin of Materials Science, 2006, 29, 641-645, doi: 10.1007/s12034-006- 0017-y.
- [7]. A. M. Kiselev, N. V. Dashchenko, “*Nanosized compounds in textile materials finishing processes*”. Russian Journal of General Chemistry, 2013, 83, 193-204, doi: 10.1134/S1070363213010404.
- [8]. G. Chen, Y. Seki, H. Kimura, S. Sakurai, M. Yumura, K. Hata, D. N. Futaba, “*Diameter control of single-walled carbon nanotube forests from 1.3-3.0 nm by arc plasma*”

- deposition*". Scientific Reports, 2014, 4, 3804, doi: 10.1038/srep03804.
- [9]. E. Tamburri, V. Guglielmotti, S. Orlanducci, M. Terranova, D. Sordi, D. Passeri, R. Matassa, M. Rossi, "Nanodiamond-mediated crystallization in fibers of PANI nanocomposites produced by template-free polymerization: Conductive and thermal properties of the fibrillar networks". Polymer, 2012, 53, 4045-4053, doi: 10.1016/J.POLYMER.2012.07.014.
- [10]. A. Hebeish, S. Sharaf, A. Farouk, "Utilization of chitosan nanoparticles as a green finish in multifunctionalization of cotton textile". International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 60, 10-17, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2013.04.078.
- [11]. M. Joshi, A. Bhattacharyya, S. W. Ali, "Characterization techniques for nanotechnology applications in textiles". Indian Journal of Fibre & Textile Research, 2008, 33, 304-317.
- [12]. R. Mahmud, F. Nabi, "Application of Nanotechnology in the field of Textile". IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering, 2017, 4, 1-6, doi: 10.9790/019x-0401010106.
- [13]. N. A. Singh, "Nanotechnology innovations, industrial applications and patents". Environmental Chemistry Letters, 2017, 15, 185-191, doi: 10.1007/s10311-017-0612-8.
- [14]. A. K. M. A. Hosne Asif, M. Z. Hasan, "Application of nanotechnology in modern textiles: A review". International Journal of Current Engineering and Technology, 2018, 8, 227-231, doi: 10.14741/ijcet/v.8.2.5.
- [15]. S. Malik, K. Muhammad, Y. Waheed, "Nanotechnology: A revolution in modern industry". Molecules, 2023, 28, 661, doi: 10.3390/molecules28020661.
- [16]. M. Krifa, C. Prichard, "Nanotechnology in textile and apparel research – An overview of technologies and processes". The Journal of the Textile Institute, 2020, 111, 1778-1793, doi: 10.1080/00405000.2020.1721696.
- [17]. H. Saleem, S. J. Zaidi, "Sustainable use of nanomaterials in textiles and their environmental impact". Materials, 2020, 13, 5134, doi: 10.3390/ma13225134.
- [18]. J. Chen, Y. G. Lu, C. Sun, "Safety and health assessment of manufactured nanoparticles in nano-coated textile products". Advanced Materials Research, 2011, 175-176, 722-728, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.175-176.722.
- [19]. L. Almeida, D. Ramos, "Health and safety concerns of textiles with nanomaterials". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 254, 102002, doi: 10.1088/1757-899x/254/10/102002.
- [20]. A. K. Yetisen, H. Qu, A. Manbachi, H. Butt, M. R. Dokmeci, J. P. Hinestroza, M. Skorobogatiy, A. Khademhosseini, S. H. Yun, "Nanotechnology in textiles". ACS Nano, 2016, 10, 3042-3068, doi: 10.1021/acsnano.5b08176.

ĐIỀU KHIỂN VẬN TỐC IN TỰ THÍCH NGHI THEO HÌNH HỌC NHẪM NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC BỀ MẶT TRONG IN 3D FDM

IMPROVING SURFACE ACCURACY IN FDM 3D PRINTING USING GEOMETRY-BASED ADAPTIVE SPEED CONTROL

Nguyễn Văn Cảnh, Ngô Quang Tú

Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

Email: tunq@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Công nghệ in 3D theo phương pháp *Fused Deposition Modeling (FDM)* hiện được ứng dụng rộng rãi nhờ ưu điểm về tính linh hoạt và chi phí vận hành thấp. Tuy nhiên, một trong những hạn chế đáng kể của phương pháp này là độ chính xác bề mặt còn thấp, đặc biệt tại các vùng có hình học phức tạp hoặc độ nghiêng lớn. Nghiên cứu này đề xuất một kỹ thuật điều khiển vận tốc in tự thích nghi, trong đó tốc độ in được điều chỉnh theo đặc điểm hình học của mô hình: tăng tại các khu vực phẳng hoặc đơn giản, và giảm tại các khu vực yêu cầu độ chính xác cao như bề mặt nghiêng hoặc chi tiết nhỏ. Kết quả thực nghiệm cho thấy kỹ thuật điều khiển vận tốc theo vùng này giúp cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt mà không làm gia tăng đáng kể thời gian in, qua đó nâng cao hiệu quả tổng thể của quá trình in FDM.

Từ khóa: In 3D; FDM; Điều khiển thích nghi.

ABSTRACT

Fused Deposition Modeling (FDM) is a widely adopted 3D printing technology due to its flexibility and low operational cost. However, a major limitation of FDM is its relatively low surface accuracy, particularly in regions with complex geometries or steep inclinations. This study proposes an adaptive print speed control technique, in which the printing speed is adjusted based on the geometric features of the model, which is increased in flat or simple areas and reduced in regions requiring higher precision, such as inclined surfaces or small features. Experimental results demonstrate that this region-specific speed adjustment significantly enhances surface quality without substantially increasing printing time, thereby improving the overall efficiency of the FDM process.

Keywords: 3D printing; FDM; Adaptive control.



1. GIỚI THIỆU

Công nghệ in 3D, đặc biệt là phương pháp Fused Deposition Modeling (FDM), đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như thiết kế sản phẩm, kỹ thuật cơ khí, và y sinh học nhờ vào khả năng tạo mẫu nhanh, chi phí thấp và khả năng sản xuất linh hoạt [1]. Tuy nhiên, một trong những hạn chế nổi bật của công nghệ này là độ chính xác bề mặt không ổn định, đặc biệt tại các khu vực hình học phức tạp như bề mặt nghiêng, góc nhỏ, hoặc các vùng được hỗ trợ bởi kết cấu support. Các khuyết điểm thường gặp bao gồm hiện tượng bậc thang (stair-stepping), rãnh lớp, biến dạng vi mô, và nhám bề mặt không kiểm soát [1, 2].

Trong những năm gần đây, nhiều giải pháp đã được nghiên cứu nhằm cải thiện chất lượng bề mặt in FDM. Một trong những cách tiếp cận phổ biến là giảm chiều cao lớp in (layer height), qua đó giảm độ nhám và cải thiện tính liên tục giữa các lớp. Mặc dù phương pháp này đơn giản và dễ thực hiện, nhưng nó làm gia tăng đáng kể thời gian in và có thể dẫn đến hiện tượng biến dạng nhiệt nếu không kiểm soát tốt [3]. Một số nghiên cứu khác đã tập trung vào việc tối ưu hóa vật liệu support như cấu trúc cây (tree support), support dạng hữu cơ hoặc cấu trúc lattice nhằm giảm ảnh hưởng lên bề mặt dưới (bottom face) của mẫu. Tuy nhiên, việc loại bỏ support sau khi in vẫn để lại dấu vết, đặc biệt ở các chi tiết nhỏ hoặc mặt nghiêng, gây ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước và tính thẩm mỹ [4].

Ngoài ra, các kỹ thuật xử lý hậu kỳ như đánh bóng cơ học, xử lý bằng hơi dung môi (acetone vapor smoothing), hoặc phủ lớp hoàn thiện cũng được áp dụng nhằm cải thiện độ mịn bề mặt. Dù mang lại hiệu quả trực quan, các kỹ thuật này tốn thêm thời gian, chi phí và

không phù hợp với các mẫu có hình học phức tạp hoặc yêu cầu giữ nguyên kích thước gốc [5]. Gần đây, một số nghiên cứu đã thử nghiệm các thuật toán tối ưu đường đi đầu in (toolpath optimization) hoặc in không theo lớp phẳng (non-planar printing), nhưng các kỹ thuật này đòi hỏi phần mềm hoặc phần cứng đặc thù, khó triển khai đại trà [3].

Bài báo đề xuất kỹ thuật điều khiển vận tốc in tự thích nghi theo hình học chi tiết, bằng cách tự động điều chỉnh tốc độ in dựa trên đặc điểm địa hình của mô hình số – giảm tốc ở vùng nghiêng, chi tiết nhỏ và tăng tốc ở vùng phẳng, đơn giản. Phương pháp tận dụng khả năng phân vùng của các phần mềm slicing hiện đại như Cura hoặc PrusaSlicer, giúp cải thiện độ chính xác bề mặt mà không làm tăng thời gian in đáng kể. Khác với các cách truyền thống, giải pháp này không yêu cầu chỉnh sửa phần cứng hay hậu xử lý phức tạp, dễ tích hợp qua G-code hoặc script. Nhờ vậy, kỹ thuật mang lại sự cân bằng giữa chất lượng và hiệu suất, phù hợp cho ứng dụng FDM quy mô nhỏ và trung bình.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, chúng tôi xây dựng một mô hình kỹ thuật số đại diện cho các dạng hình học thường gặp trong in 3D FDM gây khó khăn cho việc đảm bảo chất lượng bề mặt. Mô hình gồm ba vùng đặc trưng: Bề mặt nghiêng lớn (từ 45° đến 80°): là vùng dễ xuất hiện hiện tượng stair-stepping do hiệu ứng phân lớp; Bề mặt ngang ($0-10^\circ$): ít nhạy cảm với tốc độ in, thường không ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác bề mặt; Bề mặt lồi hoặc lõm phía trên support: dễ xuất hiện vồng, nhẵn và độ kết dính lớp kém do không có nền vững.



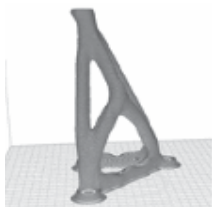
Hình 1. Hình học mẫu

Hình học mẫu được thiết kế dạng tổ hợp khối đơn giản: một khối hộp có mặt nghiêng, một mái vòm (cầu bán nguyệt) được in trên support, và một mặt phẳng chuẩn nằm ngang để làm đối chứng. Mô hình này đại diện cho các bề mặt mà chất lượng thường bị ảnh hưởng nhiều nhất bởi vận tốc in.

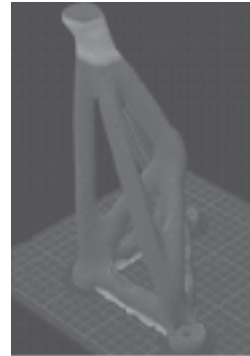
Xu hướng vận tốc in được đề xuất trong nghiên cứu này là điều chỉnh vận tốc theo từng khu vực của mô hình: giảm vận tốc tại các vùng nghiêng và vùng có support để tăng độ chính xác định hình và độ bám dính lớp, đồng thời tăng vận tốc tại các vùng phẳng nhằm rút ngắn thời gian in mà không ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng bề mặt. Sự biến thiên này là cơ sở cho kỹ thuật điều khiển vận tốc tự thích nghi được áp dụng.

2.2. Thiết lập thí nghiệm

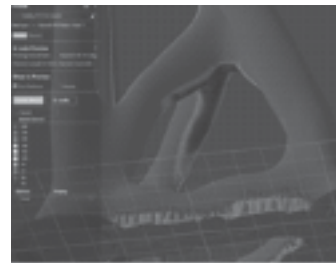
Nhằm đánh giá giả thuyết đặt ra, hai mẫu in được tạo ra từ cùng một mô hình 3D, cùng vật liệu và máy in, chỉ khác nhau về cách điều khiển vận tốc in:



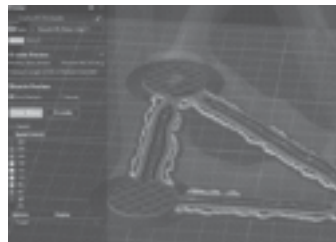
a. Lập trình bằng UltiMaker Cura với vận tốc không đổi



b. Lập trình bằng Creality print với vận tốc điều khiển thích nghi



c. Vùng có góc nghiêng lớn từ 45-80°



d. Vùng có góc nghiêng lớn hơn 80° và tiếp xúc với support

Hình 2. Điều khiển vận tốc thích nghi từng vùng

- Mẫu A (đối chứng): Cài đặt vận tốc in cố định 265 mm/s cho toàn bộ mô hình, không phân vùng điều chỉnh.

- Mẫu B (thử nghiệm): Sử dụng kỹ thuật điều khiển vận tốc tự thích nghi, trong đó vận tốc tối đa là 265 mm/s, tối thiểu là 10 mm/s.

Việc điều chỉnh được thực hiện thông qua tính năng modifier mesh của phần mềm UltiMaker Cura, creality print, kết hợp script

g-code thủ công để tối ưu chính xác theo chiều cao lớp. Thông số in còn lại được giữ nguyên giữa hai mẫu: Vật liệu nhựa PLA-CF, nhiệt đầu in là 210°C, tốc độ làm mát là 100%. Đây là thiết lập chuẩn hóa để đảm bảo mọi khác biệt về chất lượng bề mặt đến từ sự vận tốc in.

2.3. Quy trình đo và đánh giá

Đánh giá ngoại quan hai mẫu được quan sát và so sánh bằng mắt thường và kính lúp kỹ thuật số để nhận biết các lỗi bề mặt phổ biến: stair-step, vồng, rãnh lõp, tách lớp tại vùng nghiêng hoặc vùng trên support.

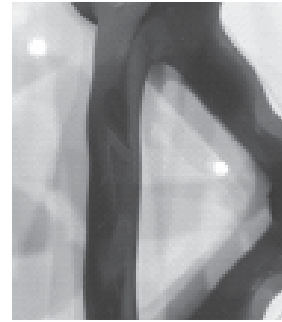
Sử dụng máy quét 3D MCAX để so sánh mô hình in thực tế với mô hình CAD ban đầu. Sai lệch hình học được thể hiện qua bản đồ màu (deviation map) và thống kê độ lệch trung bình $\pm\sigma$ giữa các vùng đo.



a. Bề mặt tiếp xúc với support

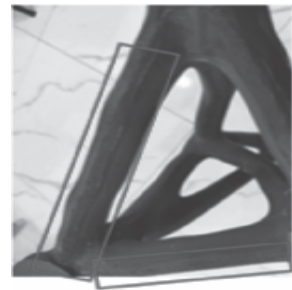


b. Bề mặt nghiêng lớn (từ 45° đến 80°)



c. Bề mặt ngang (0-10°)

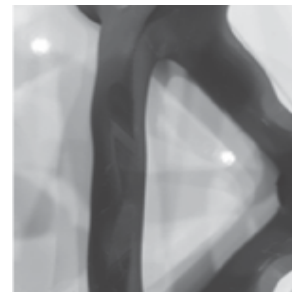
Hình 4. Mẫu in theo phương pháp điều khiển vận tốc thích nghi từng vùng



a. Bề mặt tiếp xúc với support



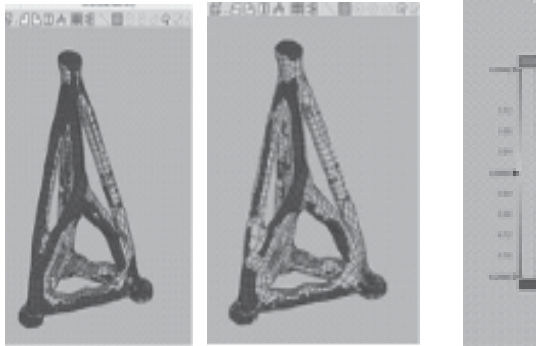
b. Bề mặt nghiêng lớn (từ 45° đến 80°)



c. Bề mặt ngang (0-10°)

Hình 5. Mẫu in theo phương pháp thông thường với vận tốc không đổi

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



Mẫu 1 Mẫu 2 Thang đo sai số
Hình 6. Kiểm tra sai số của mô hình sau in với bản thiết kế

Các kết quả thu được từ quá trình thử nghiệm đã xác nhận rõ hiệu quả của phương pháp điều khiển vận tốc tự thích nghi đối với việc cải thiện độ chính xác bề mặt trong in FDM.

3.1. Đánh giá trực quan

Quan sát sơ bộ bằng mắt thường và kính lúp kỹ thuật số cho thấy mẫu in sử dụng vận tốc tự thích nghi (Mẫu B) có bề mặt đồng đều hơn, các chi tiết nhỏ và vùng nghiêng thể hiện độ sắc nét và độ bám dính giữa các lớp tốt hơn. Cụ thể:

- Tại vùng nghiêng (45° đến 80°), hiện tượng stair-stepping và tách lớp ở Mẫu A (vận tốc cố định) diễn ra rõ rệt, trong khi Mẫu B thể hiện các lớp mịn hơn, ít rãnh và liên kết tốt.

- Ở vùng có góc nghiêng $>80^\circ$ và tiếp xúc với support, Mẫu A xuất hiện tình trạng vồng và bề mặt nhẵn do tốc độ cao làm giảm độ kết dính lớp; trong khi đó, Mẫu B thể hiện cấu trúc ổn định hơn nhờ vận tốc thấp được áp dụng ở khu vực này.

- Tại bề mặt ngang ($0-10^\circ$), sự khác

biệt giữa hai mẫu không đáng kể, xác nhận giả thuyết rằng vùng này ít nhạy cảm với tốc độ in.

3.2. Đo sai lệch hình học bằng máy quét 3D

Kết quả đo từ hệ thống quét 3D MCAX và phần mềm Geomagic Control X cho thấy sai số trung bình tại các vùng nghiêng của Mẫu B thấp hơn đáng kể so với Mẫu A. Cụ thể:

Bảng 1. Đánh giá kết quả đo sai lệch

Vị trí đo	Mẫu A (mm)	Mẫu B (mm)	Giảm sai số (%)
Vùng nghiêng $45^\circ-80^\circ$	± 0.39	± 0.18	$\sim 53.8\%$
Vùng tiếp xúc với support	± 0.42	± 0.22	$\sim 47.6\%$
Vùng ngang ($0-10^\circ$)	± 0.10	± 0.08	$\sim 20.0\%$

3.3. Thảo luận kết quả

Kết quả trên cho thấy hiệu quả rõ rệt của kỹ thuật điều khiển vận tốc thích nghi, đặc biệt tại các khu vực hình học phức tạp. Việc giảm tốc độ in tại các vùng khó giúp tăng thời gian làm nguội từng lớp, giảm hiện tượng vồng và cải thiện độ bám dính giữa các lớp nhựa.

Ngoài ra, việc tăng tốc độ tại các vùng đơn giản giúp rút ngắn thời gian in mà không làm suy giảm chất lượng bề mặt. Phương pháp này không chỉ cải thiện tính chính xác mà còn giữ được hiệu suất in ở mức tối ưu.

So với phương pháp giảm chiều cao lớp hoặc xử lý sau in, giải pháp này có các ưu điểm sau:

- Không làm tăng đáng kể thời gian in tổng thể.



- Không cần thay đổi phần cứng hoặc can thiệp vật lý vào máy in.

- Dễ dàng triển khai qua các phần mềm slicing hiện đại có hỗ trợ phân vùng vận tốc (như Cura, PrusaSlicer).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chứng minh kỹ thuật điều khiển vận tốc in tự thích nghi giúp cải thiện đáng kể độ chính xác bề mặt trong in 3D FDM, đặc biệt tại các vùng hình học phức tạp như bề mặt nghiêng hoặc vùng có support. Bằng cách điều chỉnh linh hoạt vận tốc theo từng khu vực, phương pháp này giảm sai số hình học từ 40-50% so với in với vận tốc cố định, mà không cần thay đổi phần cứng hay hậu xử lý phức tạp. Giải pháp dễ triển khai qua các phần mềm Slicing phổ biến và phù hợp với nhiều loại mô hình, mang lại hiệu quả cao cho sản xuất mẫu kỹ thuật hoặc sản phẩm yêu cầu bề mặt tốt. Trong tương lai, kỹ thuật có thể được mở rộng bằng cách kết hợp với điều chỉnh chiều cao lớp, kiểm soát nhiệt độ theo vùng hoặc tối ưu hóa đường in để nâng cao chất lượng và năng suất.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội trong khuôn khổ đề tài mã số: 02-2024-RD/HĐ-ĐHCN. ❖

Ngày nhận bài: **09/6/2025**

Ngày phản biện: **24/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Hisham M, Shebeeb C M, C D, Jacob L, Butt H., “*Additive manufacturing of carbon nanocomposites for structural applications*”. J. Mater. Res. Technol. 2024;28:4674-93. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.049>.
- [2]. Li Y, Lau D., “*Advances in shape memory polymers and their composites: From theoretical modeling and MD simulations to additive manufacturing*”. Giant 2024;18.
- [3]. Kalpakjian S., “*Manufacturing Engineering & Technology*”. 7th ed. Pearson; 2013.
- [4]. Nguyen V-C, Tien DH, Ngo QT, Pham V-T, Nguyen B-N, Huy-Kien Nguyen, “*Structural Performance and Optimization of 3D- Printed PLA Lattice Structures for Sustainable Design in Load-Bearing Applications*”. Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 2025;15:21086-92.
- [5]. Makki T, Vattathurvalappil SH, Theravalappil R, Nazir A, Alhajer A, Azeem MA, et al., “*3D and 4D printing: A review of virgin polymers used in fused deposition modeling*”. Compos Part C Open Access 2024;14:100472.

PHÂN TÍCH UỐN TĨNH CỦA TẤM COMPOSITE NHIỀU LỚP TRÊN NỀN ĐÀN HỒI

STATIC BENDING STUDIES OF MULTY-LAYER COMPOSITE PLATES RESTING ON ELASTIC FOUNDATION

Nguyễn Thanh Tùng

Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

Email: thanhtung1106@gmail.com

TÓM TẮT

Trên cơ sở lý thuyết tấm cải tiến, nghiên cứu này đã thiết lập bài toán, xây dựng phương trình cân bằng và đề xuất phương pháp giải bằng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích đáp ứng uốn của tấm composite nhiều lớp tựa trên nền đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh. Sự thú vị trong bài báo này là tấm composite đã kết hợp hai vật liệu gốm và kim loại để các đặc trưng cơ tính biến đổi trơn liên tục tại hai lớp bề mặt, điều này làm cho tấm composite tận dụng ưu điểm của cả gốm và kim loại một cách hợp lý. Phương trình cân bằng của tấm composite được tìm ra trên cơ sở nguyên lý công khả dĩ, bằng việc sử dụng phần tử bốn nút, bài báo đã thiết lập phương trình cân bằng cho tấm composite ở dạng phần tử hữu hạn. Bài báo cũng so sánh với kết quả chính xác đã được công bố trước đây để chứng minh lý thuyết tính toán là hoàn toàn phù hợp. Từ đó, bài báo đã khảo sát ảnh hưởng của một loạt các tham số hình học, vật liệu, điều kiện biên đến chuyển vị uốn của tấm composite. Đây là các số liệu tham khảo có giá trị giúp các kỹ sư lựa chọn tham số thiết kế các kết cấu dạng tấm nhiều lớp trong thực tế.

Từ khóa: Phương pháp phần tử hữu hạn; Lý thuyết tấm cải tiến; Composite; Nền đàn hồi.

ABSTRACT

Based on the new shear deformation plate theory, this study has established the problem, find the equilibrium equations and proposed a solution method using the finite element method to analyze the bending response of a multilayer composite plate resting on an elastic foundation under the effect of static load. The interesting thing in this paper is that the composite plate has combined two materials, ceramic and metal, so that the mechanical properties vary smoothly continuously at the two surface layers, which makes the composite plate take advantage of both ceramic and metal reasonably. The equilibrium equation of the composite plate is found on the basis of the principle of possible work, by using four-node elements, the paper has established the equilibrium equation for the composite plate in the form of finite elements. The paper also compares with the previously published exact results to prove that the calculation theory is completely suitable. From there, the paper has investigated the influence of a series of geometric parameters, materials, boundary conditions on the bending displacement of the composite plate. These are valuable reference data to help engineers select design parameters for multi-layer plate structures in practice.

Keywords: Finite element method; New shear deformation plate theory; Composite; Elastic foundations. 

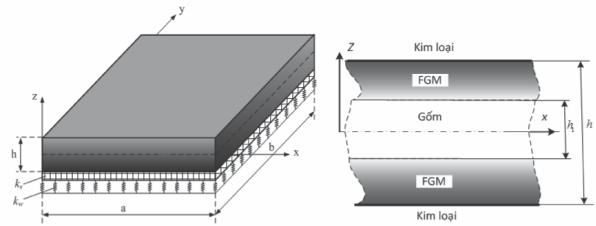
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, các kết cấu nhiều lớp được chế tạo từ vật liệu có cơ tính biến thiên (chủ yếu là từ gốm và kim loại) đã được các nhà khoa học áp dụng để tạo ra các sản phẩm công nghệ cao như loa phụt tên lửa, buồng đốt động cơ tên lửa, vách ngăn lò phản ứng hạt nhân,... Điều này là do vật liệu kết hợp giữa gốm và kim loại có những ưu điểm đặc biệt mà các loại vật liệu khác không có được như khả năng chịu lực tốt, chịu được ma sát và mài mòn, khả năng làm việc được trong môi trường nhiệt độ cao.

Việc nghiên cứu toàn diện đối với các kết cấu làm bằng vật liệu cơ tính biến đổi (từ sự pha trộn giữa gốm và kim loại) là một yêu cầu cấp thiết, trong đó nghiên cứu để hiểu rõ quy luật ứng xử cơ học của các kết cấu này cũng là một đòi hỏi từ thực tế khách quan. Vượng [1] đã đề xuất phương pháp phần tử hữu hạn để nghiên cứu uốn tĩnh của tấm composite cơ tính biến thiên một lớp tựa trên nền đàn hồi, sự thú vị của nghiên cứu này là xem xét vật liệu phân bố không liên tục theo chiều dày. Tiếp tục thành công này, tác giả Vượng đã đi vào giải quyết bài toán ổn định của tấm composite cơ tính biến thiên [2], tác giả đã làm rõ ảnh hưởng của nhiều tham số như sự phân bố vật liệu, điều kiện hình học của tấm đến khả năng chịu tải nén của tấm này. Ngoài ra, một số kết quả tính toán hay đối với các kết cấu composite cơ tính biến thiên cũng được chỉ ra trong các công trình [3] đến [7].

2. ĐẶT BÀI TOÁN VÀ LỜI GIẢI

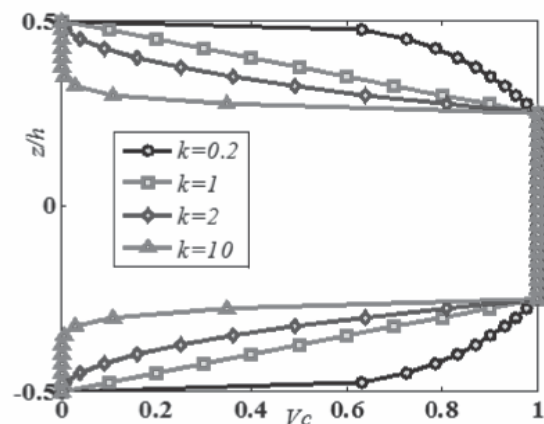
Tấm composite nhiều lớp tựa trên nền đàn hồi như trên hình 1, các thông số hình học của tấm là chiều dài a , chiều rộng b và chiều cao h , tấm đặt trong hệ tọa độ Oxyz.



Hình 1. Tấm composite tựa trên nền đàn hồi

Tấm gồm ba lớp, lớp giữa là vật liệu gốm đồng nhất, hai lớp bề mặt làm từ gốm và kim loại với tỷ lệ thể tích trong mỗi lớp là $V_m^{(i)}$, $V_c^{(i)}$, giữa hai thành phần này có biểu thức:

$$V_m^{(i)} + V_c^{(i)} = 1 \quad (1)$$



Hình 2. Sự biến đổi của V_c theo chiều dày tấm, tỷ lệ chiều dày ba lớp là 1-2-1

Mô đun đàn hồi và hệ số Poisson trong mỗi lớp thứ i được biểu diễn:

$$\{E^{(i)}, \nu^{(i)}\} = \{E_m^{(i)}, \nu_m^{(i)}\} + \left(\{E_c^{(i)}, \nu_c^{(i)}\} - \{E_m^{(i)}, \nu_m^{(i)}\} \right) V_c^{(i)} \quad (2)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} V_c^{(1)} = \left((2z+h) / (h-h_1) \right)^k; & -0.5h \leq z \leq -0.5h_1 \\ V_c^{(2)} = 1; & -0.5h_1 \leq z \leq 0.5h_1 \\ V_c^{(3)} = \left((2z-h) / (h_1-h) \right)^k; & 0.5h_1 \leq z \leq 0.5h \end{cases} \quad (3)$$

Hình 2 thể hiện sự phụ thuộc của tỷ lệ thể tích V_c theo chiều dày tấm trong trường hợp tỷ lệ chiều dày ba lớp là 1-2-1.

Để xây dựng biểu thức tính toán, bài báo này xuất phát từ lý thuyết biến dạng cắt kiểu mới:

$$\begin{cases} \{u, v\}(x, y, z) = -z \partial u_b / \{\partial x, \partial y\} - f_z \partial u_s / \{\partial x, \partial y\} \\ u_z(x, y, z) = u_b(x, y) + u_s(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó, $f_z = z - (h/\pi) \sin(z\pi/h)$. Việc sử dụng lý thuyết biến dạng cắt theo biểu thức (4) có nhiều ưu điểm, trong đó có kể đến ảnh hưởng của biến dạng cắt, thể hiện đúng sự phân bố của ứng suất tiếp theo chiều dày, và không cần đến hệ số hiệu chỉnh cắt, nhưng vẫn mô tả đúng đáp ứng cơ học của tấm. Sau đây, bài báo sẽ xây dựng các biểu thức tính toán dựa trên trường chuyển vị này.

Từ việc đạo hàm các thành phần chuyển vị (1), bài báo thu được hai véc tơ biến dạng:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = z \boldsymbol{\varepsilon}_z + f_z \boldsymbol{\varepsilon}_f; \quad \boldsymbol{\gamma}_s = g_z \boldsymbol{\gamma}_{s0} \quad (5)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_z &= \{\varepsilon_{zx}, \varepsilon_{zy}, \varepsilon_{zz}\}^T; \\ \boldsymbol{\varepsilon}_f &= \{\varepsilon_{fx}, \varepsilon_{fy}, \varepsilon_{fz}\}^T; \\ \boldsymbol{\gamma}_{s0} &= \{\gamma_{sxz}, \gamma_{syx}\}^T; \quad \varepsilon_{zx} = -\partial^2 u_b / \partial x^2; \\ \varepsilon_{zy} &= -\partial^2 u_b / \partial y^2; \\ \varepsilon_{zz} &= -2\partial^2 u_b / \partial x \partial y; \\ \varepsilon_{fx} &= -\frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_{fy} = -\partial^2 u_s / \partial y^2; \\ \varepsilon_{fz} &= -2\partial^2 u_s / \partial x \partial y; \quad \gamma_{sxz} = \partial u_s / \partial x; \\ \gamma_{syx} &= \partial u_s / \partial y; \quad g_z = 1 - df_z / dz \end{aligned} \quad (6)$$

Sự tương quan giữa ứng suất của lớp thứ i và biến dạng như sau:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^i = \frac{E_i}{1-\nu_i^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_i & 0 \\ \nu_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_i)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}^i = \mathbf{G}_b^i \boldsymbol{\varepsilon}^i \\ \begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}^i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}^i = \mathbf{G}_s^i \boldsymbol{\gamma}_s^i \end{cases} \quad (7)$$

Các thành phần nội lực bao gồm mô men và lực cắt của một điểm bất kỳ thuộc tấm:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_{xy} \end{bmatrix} = \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_b^i \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}^i [z, f_z] dz = [\mathbf{A}_z, \mathbf{B}_f] \boldsymbol{\varepsilon}_z + [\mathbf{B}_f, \mathbf{D}_f] \boldsymbol{\varepsilon}_f \\ \begin{bmatrix} Q_{xz} \\ Q_{yz} \end{bmatrix} = \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_s^i \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}^i dz = \mathbf{A}_s \boldsymbol{\gamma}_{s0} \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó:

$$\{\mathbf{A}_z, \mathbf{B}_f, \mathbf{D}_f\} = \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_b^i \{z^2, z f_z, f_z^2\} dz; \quad \mathbf{A}_s = \sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \mathbf{G}_s^i g_z dz \quad (9)$$

Để tìm phương trình cân bằng cho tấm nhiều lớp, bài báo áp dụng nguyên lý công khả dĩ, biểu thức tính toán có dạng:

$$\delta \Pi_{tam} + \delta \Pi_{nen} - \delta \Pi_{luc} = 0 \quad (10)$$

Với $\delta \Pi_{tam}$, $\delta \Pi_{nen}$, $\delta \Pi_{luc}$ lần lượt là công khả dĩ của tấm, công khả dĩ của nền và công khả dĩ của lực ngoài tác dụng vuông góc với tấm.

Công khả dĩ của tấm composite nhiều lớp do biến dạng được xác định:

$$\delta \Pi_{tam} = \int_{\Omega} \left[\sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \left(\sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} \right) dz d\Omega \right] = \int_{\Omega} \left[\sum_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} \left(-M_x \frac{\partial^2 \delta u_x}{\partial x^2} - S_x \frac{\partial^2 \delta u_x}{\partial x^2} - M_y \frac{\partial^2 \delta u_y}{\partial y^2} - S_y \frac{\partial^2 \delta u_y}{\partial y^2} - 2M_{xy} \frac{\partial^2 \delta u_{xy}}{\partial x \partial y} - 2S_{xy} \frac{\partial^2 \delta u_{xy}}{\partial x \partial y} + Q_{xz} \frac{\partial \delta u_x}{\partial x} + Q_{yz} \frac{\partial \delta u_y}{\partial y} \right) dz d\Omega \right] \quad (11)$$

Công khả dĩ của nền đàn hồi tác dụng lên tấm nhiều lớp có dạng:

$$\delta \Pi_{nen} = \int_{\Omega} \left(k_w u_z \delta u_z + k_s \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} \delta \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \delta \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right) d\Omega \quad (12)$$

Công sinh ra do ngoại lực tác dụng vuông góc với mặt phẳng tấm có dạng:

$$\delta \Pi_{luc} = \int_{\Omega} q \delta u_z dA = \int_{\Omega} q \delta (u_b + u_s) d\Omega \quad (13)$$

Với q là ngoại lực vuông góc với mặt phẳng tấm. Các biểu thức (11) đến (13) được thế vào phương trình (10), bài báo thu được các phương trình cân bằng của tấm nhiều lớp:

$$\begin{aligned} u_b \frac{\partial}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + k_w u_z + k_s \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) + q &= 0 \\ u_s \frac{\partial S_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 S_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 S_y}{\partial y^2} + \frac{\partial F_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yz}}{\partial y} + k_w u_z + k_s \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) + q &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Để giải hệ phương trình (14), bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, đây là phương pháp có nhiều ưu điểm, đặc biệt là đối với điều kiện biên bất đối xứng. Tấm composite được chia ra các phần tử chữ nhật bốn nút, mỗi nút có sáu bậc tự do:

$$u_e = \sum_{i=1}^4 \left\{ u_{bi}, u_{si}, \left(\frac{\partial u_b}{\partial x} \right)_i, \left(\frac{\partial u_s}{\partial x} \right)_i, \left(\frac{\partial u_b}{\partial y} \right)_i, \left(\frac{\partial u_s}{\partial y} \right)_i \right\}^T \quad (15)$$

Bằng các phép biến đổi, phương trình cân bằng (13) được đưa về dạng chuẩn của phương pháp phần tử hữu hạn:

$$\sum_e (K_e + K_e^f) \sum_e u_e = \sum_e P_e \quad (16)$$

Giải phương trình (16), bài báo tìm được chuyển vị uốn của tấm composite.

3. TÍNH TOÁN SỐ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sự tin cậy của lý thuyết tính toán

Phần này đưa ra ví dụ so sánh chuyển vị uốn của tấm composite FGM để làm rõ sự tin cậy của lý thuyết đã trình bày ở phần trên, tấm có các thông số $a, h = a/10$, vật liệu tấm có đặc trưng cơ tính $E_c = 380 \text{ GPa}$, $E_m = 70 \text{ GPa}$, $v_c = v_m = 0.3$, tải trọng tác dụng lên tấm gồm hai dạng là phân bố đều và phân bố hình sin. Chuyển vị lớn nhất của tấm được tính toán theo công thức $Cv^* = 10w_{\max} h^3 E_c / Pa^4$ và được so sánh như trong bảng 1, trong đó tài liệu [5] sử dụng lời giải dạng giải tích để đưa ra kết quả chính xác. Bằng việc nhìn vào các số liệu so sánh như trong bảng 1, dễ dàng thấy rằng kết quả của bài báo rất sát với các kết quả đã công bố, điều này minh chứng sự đúng đắn và tin cậy của phương pháp tính toán mà bài báo xây dựng ở phần trên.

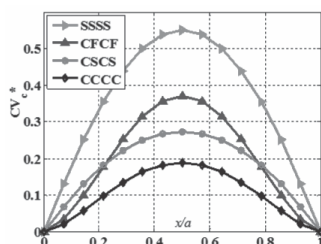
Bảng 1. So sánh chuyển vị lớn nhất của tấm composite

Chuyển vị	Tải trọng phân bố đều			Tải trọng hình sin		
	k = 0	k = 1	k = 2	k = 0	k = 1	k = 2
Bài báo	0.46	0.92	1.18	0.29	0.58	0.75
Kết quả chính xác [5]	0.46	0.92	1.19	0.29	0.58	0.75

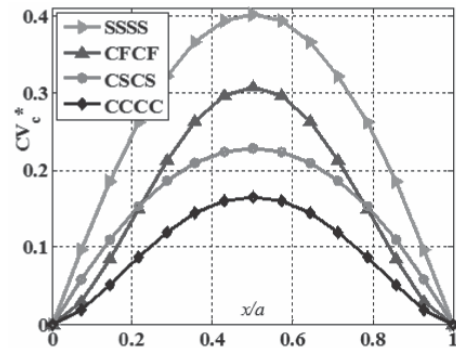
3.2. Khảo sát ảnh hưởng của một số tham số

Tấm composite ba lớp có tỷ lệ chiều dày các lớp là 1-2-1, tấm được chế tạo từ gốm và kim loại với các tham số vật liệu như ở phần trên, thông số hình học của tấm $a = 0.5$ m chiều rộng b thay đổi tại mỗi trường hợp, chiều dày $h = a/10$. Thông số khảo sát là chuyển vị tại vị trí $y = b/2$ được tính toán theo công thức $CV_c^* = 100w_z h^3 E_c / Pa^4$.

- Ảnh hưởng của điều kiện biên: Để xem xét ảnh hưởng của điều kiện biên đến đáp ứng uốn của tấm, bài báo tính toán ở bốn điều kiện biên được ký hiệu tương ứng là SSSS (tất cả các cạnh tựa đơn), CFCF (hai cạnh đối diện ngàm và hai cạnh còn lại tựa đơn), CSCS (hai cạnh đối diện ngàm và hai cạnh còn lại tựa đơn), CCCC (tất cả các cạnh tựa đơn đều ngàm), kết quả tính toán chuyển vị tại vị trí $y = b/2$ được vẽ trên hình 3 tương ứng với trường hợp chưa xét đến nền đàn hồi và có xét đến nền đàn hồi. Bài báo nhận thấy: Tấm có các cạnh bị ngàm (CCCC) thì chuyển vị là nhỏ nhất, điều này là do số bậc tự do bị hạn chế nhiều nhất, nên tấm trở lên cứng nhất. Và với tấm có tất cả các cạnh đều tựa đơn (SSSS) thì chuyển vị của tấm là lớn nhất. Ngoài ra, đường độ võng tại giữa tấm cũng thay đổi hình dạng khi điều kiện biên thay đổi. Chuyển vị của tấm khi có nền đàn hồi nhỏ hơn so với tấm không tựa trên nền đàn hồi, điều này là độ cứng của tấm đã được tăng lên khi tựa trên nền đàn hồi, do vậy khả năng chịu tải của tấm cũng tăng khi có nền đàn hồi.



(a) $K_w = 0, K_s = 0$



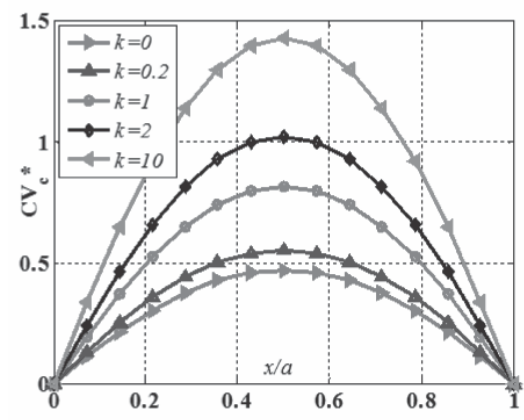
(b) $K_w = 25, K_s = 5$

Hình 3. Đường độ võng tại giữa tấm ở các điều kiện biên khác nhau, $b = a, k = 0.2$

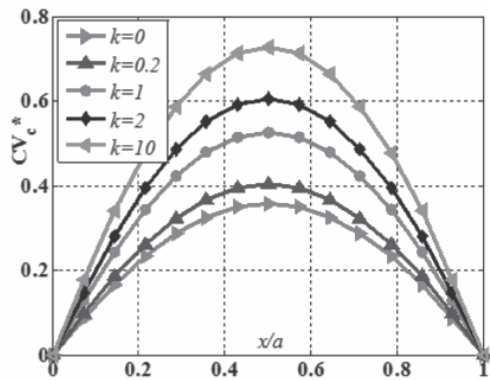
- Ảnh hưởng của chỉ số mũ thể tích k : Sự thay đổi của độ võng giữa tấm composite phụ thuộc vào chỉ số mũ thể tích k được vẽ trên hình 4, bài báo nhận thấy:

+ Sự tăng lên của chuyển vị tỷ lệ thuận với sự tăng lên của chỉ số mũ thể tích k , nguyên nhân là do khi số mũ k tăng lên thì khối lượng kim loại trong tấm tăng lên, làm độ cứng của tấm composite giảm.

+ Tuy nhiên mức độ tăng lên của chuyển vị thể hiện rõ rệt nhất khi chỉ số mũ thể tích k tăng từ 0 đến 2, còn khi số mũ k tăng từ 2 đến 10 thì chuyển vị của tấm cũng tăng lên nhưng mức độ tăng không nhiều.

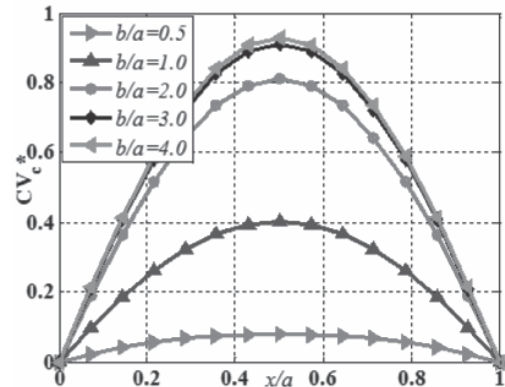


(a) $K_w = 0, K_s = 0$



b) $K_w = 25, K_s = 5$

Hình 4. Đường độ võng tại giữa tấm ở các giá trị k khác nhau, $b/a = 1$, SSSS



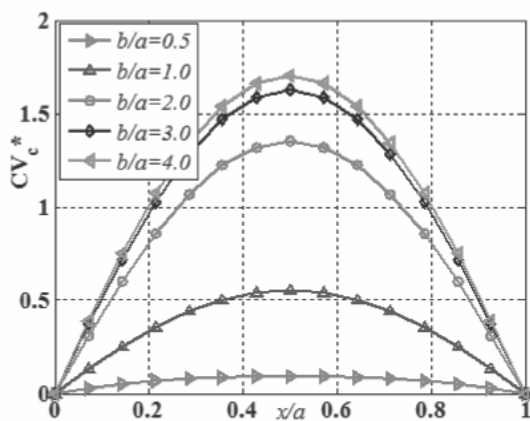
(b) $K_w = 25, K_s = 5$

Hình 5. Đường độ võng tại giữa tấm ở các giá trị b/a khác nhau, $k = 0.2$, SSSS

- Ảnh hưởng của tỷ lệ chiều dài hai cạnh tấm b/a : Trên hình 5 vẽ sự biến đổi của đường độ võng tại giữa tấm phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dài hai cạnh tấm b/a , các kết quả tính toán này thể hiện:

+ Giá trị của tỷ lệ chiều dài hai cạnh tấm b/a càng lớn thì chuyển vị lớn nhất của tấm composite tăng lên, điều này là do độ cứng của tấm giảm xuống, tuy nhiên khi tỷ lệ $b/a > 3$ thì chuyển vị tăng lên không rõ rệt.

+ Nền đàn hồi làm giảm chuyển vị của tấm trong các trường hợp khác nhau của tỷ lệ hai cạnh tấm b/a .



(a) $K_w = 0, K_s = 0$

4. KẾT LUẬN CHUNG

Bài báo kết hợp giữa lý thuyết biến dạng cắt kiểu mới và phương pháp mô phỏng hữu hạn để phân tích chuyển vị uốn của tấm composite nhiều lớp tựa trên nền đàn hồi hai hệ số, trong đó tấm được làm từ gốm và kim loại được pha trộn theo tỷ lệ thể tích nhất định. Phần tử bốn điểm nút, mỗi nút gồm sáu bậc tự do để xây dựng phương trình cân bằng và thuật toán giải. Trên cơ sở các kết quả tính toán và phân tích, bài báo rút ra một số nhận xét quan trọng sau đây: Tấm có các cạnh ngàm thì chuyển vị là nhỏ nhất, điều kiện biên vừa ảnh hưởng đến hình dạng của đường độ võng của tấm composite, đồng thời điều kiện biên cũng ảnh hưởng đến giá trị lớn nhất của chuyển vị. Chỉ số mũ thể tích k làm cho hàm lượng kim loại trong tấm tăng lên hoặc giảm, tức là độ cứng của tấm cũng tăng hoặc giảm, do vậy làm thay đổi độ võng của tấm, cụ thể ở đây là độ võng tăng lên cùng với sự tăng lên của chỉ số mũ thể tích k . Đây là nghiên cứu có giá trị khoa học thiết thực, làm tài liệu tham chiếu khi thiết kế cho các kỹ sư. ♦

Ngày nhận bài: 02/6/2025

Ngày phản biện: 15/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Vuong, D. V (2025), “*Nghiên cứu uốn tĩnh của tấm FGM có vật liệu phân bố không liên tục*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, 61, số 5A, tr. 94- 99.
- [2]. Vuong, D. V (2025), “*Nghiên cứu ổn định của tấm FGM có vật liệu phân bố không liên tục*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 327, tr. 78-84.
- [3]. Aman. G, Chalak. H. D, Anupam. C (2022), “*Bending analysis of functionally graded sandwich plates using Hozt including transverse displacement effects*”. Mechanics Based Design of Structures and Machines. 50 (10), pp. 3563-3577.
- [4]. Ouinas. D, Fekirini. H, Olay. J. A, Achour. B, Boukendakdji. M (2022), “*New hybrid HSDT for bending, free vibration, and buckling analysis of FGM plates (2D & quasi-3D)*”. Smart Structures and Systems, 29 (3), pp. 395-420.
- [5]. Zenkour. A. M (2009), “*Generalized shear deformation theory for bending analysis of functionally graded plates*”. Applied Mathematical Modelling, 2009, 30 (1), pp. 67-84.
- [6]. Pham. T. D, Pham. Q. H, Phan. V. D, Nguyen. H. N, Do. V. T (2019), “*Free vibration analysis of functionally graded shells using an edge-based smoothed finite element method*”. Symmetry, 11 (5), 684.
- [7]. Ke. T. V, Minh. P. V, Dung. N. T, Thai. L. M, Thom. D. V (2024), “*Flexoelectric effect on bending and free vibration behaviors of piezoelectric sandwich FGP nanoplates via nonlocal strain gradient theconory*”. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2024, 12 (4), 6567-6596.

ỨNG DỤNG ANSYS TRONG PHÂN TÍCH KẾT QUẢ GIA NHIỆT BẰNG KHÍ CHO LÒNG KHUÔN PHUN ÉP NHỰA

APPLICATION OF ANSYS IN ANALYZING GAS HEATING RESULTS FOR INJECTION MOLD CAVITIES

Cao Hoàng Thông, Trần Thanh Thường, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 22144201@student.hcmute.edu.vn; thuongtt@hcmute.edu.vn;

haspkt@hcmute.edu.vn; *duyqh@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Gia nhiệt khuôn là một trong những yếu tố quyết định đến chất lượng và tính ổn định của sản phẩm trong công nghệ ép phun nhựa. Trong những năm gần đây, phương pháp gia nhiệt bằng khí nóng đã được nghiên cứu như một giải pháp tiềm năng nhằm nâng cao hiệu suất truyền nhiệt và giảm thiểu thời gian chu kỳ. Nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng phần mềm ANSYS để mô phỏng và phân tích quá trình truyền nhiệt bên trong lòng khuôn hình chữ nhật khi sử dụng khí nóng làm nguồn gia nhiệt. Dựa trên mô hình 3D và các điều kiện biên thực tế, nghiên cứu đánh giá được sự phân bố nhiệt độ, hiệu suất gia nhiệt, cũng như các yếu tố ảnh hưởng như tốc độ dòng khí, vị trí đầu phun và vật liệu khuôn. Kết quả mô phỏng phù hợp với các nghiên cứu thực nghiệm trước đó và cho thấy tiềm năng rõ rệt của việc tối ưu hóa thông số gia nhiệt nhằm cải thiện độ đồng đều nhiệt và chất lượng sản phẩm. Những phân tích này góp phần làm rõ cơ chế truyền nhiệt trong khuôn, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế hệ thống gia nhiệt hiệu quả hơn trong công nghệ ép phun nhựa hiện đại.

Từ khoá: Phun ép nhựa; Khuôn nhiệt; Gia nhiệt bằng khí nóng; ANSYS; Mô phỏng truyền nhiệt.

ABSTRACT

Mold heating is one of the key factors determining the quality and stability of products in plastic injection molding technology. In recent years, gas-assisted heating has been investigated as a promising solution to enhance heat transfer efficiency and reduce cycle time. This study focuses on the application of ANSYS software to simulate and analyze the heat transfer process within the mold cavity when hot gas is used as the heating source. Based on a 3D model and realistic boundary conditions, the study evaluates temperature distribution, heating efficiency, and various influencing factors such as heating time, number of vent holes, nozzle height, inlet temperature, and insert plate thickness. The simulation results are consistent with previous experimental studies and clearly demonstrate the potential of optimizing heating parameters to improve thermal uniformity and product quality. These analyses help clarify the heat transfer mechanism inside the mold and provide a scientific basis for designing more efficient heating systems in modern injection molding technology.

Keywords: Injection molding; Mold heating; ANSYS; Gas-assisted heating; Heating transfer simulation.

1. TỔNG QUAN

Công nghệ phun ép nhựa là một trong những phương pháp sản xuất phổ biến nhất trong ngành công nghiệp chế tạo, đặc biệt trong việc sản xuất các sản phẩm nhựa có độ chính xác cao như linh kiện ô tô, thiết bị y tế và sản phẩm tiêu dùng [1]. Quá trình phun ép nhựa bao gồm việc nung chảy nhựa, bơm vào khuôn và làm nguội để tạo hình sản phẩm. Một trong các yếu tố quyết định chất lượng sản phẩm là khả năng kiểm soát nhiệt độ của lòng khuôn, nơi nhựa được định hình [2]. Nhiệt độ khuôn không chỉ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của sản phẩm mà còn tác động đến thời gian chu kỳ sản xuất và độ bền của khuôn [3].

Hệ thống gia nhiệt lòng khuôn truyền thống thường sử dụng nước nóng hoặc dầu, nhưng những phương pháp này có hạn chế về hiệu suất truyền nhiệt và thời gian đáp ứng nhiệt [4]. Trong những năm gần đây, gia nhiệt bằng khí nóng đã nổi lên như một giải pháp thay thế tiềm năng nhờ khả năng truyền nhiệt nhanh, kiểm soát nhiệt độ chính xác và giảm thiểu tổn thất năng lượng [5]. Tuy nhiên, việc áp dụng gia nhiệt bằng khí đòi hỏi phân tích kỹ lưỡng các đặc tính nhiệt và dòng chảy trong lòng khuôn để đảm bảo hiệu quả và chất lượng sản phẩm [6]. Đây là nơi phần mềm mô phỏng như ANSYS đóng vai trò quan trọng, cho phép các nhà thiết kế phân tích và tối ưu hóa quá trình gia nhiệt trước khi triển khai thực tế [7].

(*) Tổng quan về ANSYS và ứng dụng trong mô phỏng nhiệt

ANSYS là một phần mềm mô phỏng kỹ thuật đa năng, được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như cơ học, nhiệt học, động lực học chất lỏng và phân tích kết cấu [8]. Trong lĩnh vực phun ép nhựa, ANSYS cung cấp các

công cụ mạnh mẽ để mô phỏng quá trình truyền nhiệt, dòng chảy nhựa và ứng suất cơ học trong lòng khuôn [9]. Đặc biệt, mô-đun ANSYS Fluent và ANSYS Mechanical cho phép phân tích chi tiết các hiện tượng nhiệt và dòng chảy trong các hệ thống gia nhiệt bằng khí, từ đó dự đoán các vấn đề tiềm ẩn như phân bố nhiệt độ không đồng đều hoặc biến dạng khuôn [10].

So với các phần mềm khác như Moldflow hay COMSOL, ANSYS nổi bật nhờ khả năng tích hợp nhiều lĩnh vực vật lý trong một nền tảng duy nhất, giúp các kỹ sư thực hiện phân tích đa vật lý (multi-physics) một cách hiệu quả [11]. Ví dụ, trong phân tích gia nhiệt bằng khí, ANSYS có thể mô phỏng đồng thời quá trình truyền nhiệt đối lưu của khí nóng, truyền nhiệt dẫn qua lòng khuôn và sự thay đổi nhiệt độ của nhựa lỏng trong suốt chu kỳ phun ép [12]. Điều này không chỉ cải thiện độ chính xác của mô phỏng mà còn giảm thời gian và chi phí thiết kế [13].

(*) Gia nhiệt bằng khí trong phun ép nhựa: Cơ chế và thách thức

Gia nhiệt bằng khí hoạt động dựa trên nguyên lý truyền nhiệt đối lưu, trong đó khí nóng được thổi qua các kênh dẫn trong lòng khuôn để tăng nhiệt độ bề mặt khuôn trước khi nhựa được bơm vào [5]. Phương pháp này có một số ưu điểm vượt trội so với gia nhiệt bằng nước hoặc dầu, bao gồm khả năng đạt nhiệt độ cao trong thời gian ngắn, giảm thời gian chu kỳ và cải thiện chất lượng bề mặt sản phẩm [6]. Tuy nhiên, gia nhiệt bằng khí cũng đối mặt với nhiều thách thức, chẳng hạn như khó khăn trong việc kiểm soát dòng khí đồng đều, sự mất nhiệt qua môi trường và nguy cơ quá nhiệt ở một số khu vực của khuôn [14].

Để giải quyết các thách thức này, cần thiết phải sử dụng các công cụ mô phỏng như 

ANSYS để phân tích đặc tính nhiệt và dòng chảy của khí trong hệ thống gia nhiệt. Ví dụ, ANSYS Fluent có thể mô phỏng dòng khí nóng trong các kênh dẫn, dự đoán sự phân bố nhiệt độ và xác định các điểm nóng (hot spots) hoặc vùng nhiệt độ thấp trong lòng khuôn [10]. Kết quả mô phỏng này giúp các kỹ sư tối ưu hóa thiết kế kênh dẫn khí, điều chỉnh lưu lượng và nhiệt độ khí để đạt được hiệu suất gia nhiệt tối ưu [12].

(*) Ứng dụng cụ thể của ANSYS trong phân tích gia nhiệt bằng khí

Trong nghiên cứu về gia nhiệt bằng khí cho lòng khuôn phun ép nhựa, ANSYS được sử dụng để thực hiện các phân tích sau:

- Phân tích dòng chảy khí nóng: Sử dụng ANSYS Fluent, các nhà nghiên cứu có thể mô phỏng dòng chảy của khí nóng trong các kênh dẫn bên trong khuôn, từ đó đánh giá hiệu quả truyền nhiệt và xác định các vùng có dòng chảy rối hoặc tắc nghẽn [9]. Điều này đặc biệt quan trọng trong các khuôn có hình dạng phức tạp, nơi dòng khí có thể không phân bố đồng đều.

- Phân tích truyền nhiệt: ANSYS Mechanical và Fluent cho phép mô phỏng quá trình truyền nhiệt từ khí nóng sang bề mặt khuôn và từ khuôn sang nhựa lỏng [10]. Kết quả phân tích giúp xác định thời gian cần thiết để đạt nhiệt độ khuôn mong muốn và dự đoán sự phân bố nhiệt độ trên toàn bộ lòng khuôn.

- Phân tích ứng suất nhiệt: Nhiệt độ cao và sự thay đổi nhiệt độ nhanh trong quá trình gia nhiệt bằng khí có thể gây ra ứng suất nhiệt trong khuôn, dẫn đến biến dạng hoặc nứt gãy [13]. ANSYS Mechanical cung cấp các công cụ để phân tích ứng suất và biến dạng, từ đó đề

xuất các giải pháp thiết kế nhằm tăng độ bền của khuôn.

Tối ưu hóa thiết kế: Dựa trên kết quả mô phỏng, các kỹ sư có thể điều chỉnh các thông số như đường kính kênh dẫn khí, tốc độ dòng khí và nhiệt độ đầu vào để tối ưu hóa hiệu suất gia nhiệt và giảm tiêu thụ năng lượng [12]. ANSYS DesignXplorer còn cho phép thực hiện phân tích tối ưu hóa tham số, giúp tìm ra cấu hình thiết kế tốt nhất trong thời gian ngắn.

(*) Lợi ích và hạn chế của việc sử dụng ANSYS trong phân tích gia nhiệt bằng khí

Việc ứng dụng ANSYS trong phân tích gia nhiệt bằng khí mang lại nhiều lợi ích, bao gồm:

- Độ chính xác cao: ANSYS cung cấp các thuật toán mô phỏng tiên tiến, đảm bảo kết quả phân tích sát với thực tế [8].

- Tiết kiệm thời gian và chi phí: Mô phỏng trước khi sản xuất giúp phát hiện các vấn đề thiết kế sớm, giảm thiểu chi phí thử nghiệm thực tế [11].

- Khả năng tích hợp đa vật lý: ANSYS cho phép phân tích đồng thời các hiện tượng nhiệt, dòng chảy và cơ học, cung cấp cái nhìn toàn diện về hiệu suất hệ thống [12].

Tuy nhiên, phương pháp này cũng có một số hạn chế. Thứ nhất, ANSYS yêu cầu người dùng có kiến thức chuyên môn về mô phỏng và kỹ thuật để thiết lập mô hình và phân tích kết quả một cách chính xác [9]. Thứ hai, việc mô phỏng các hệ thống phức tạp đòi hỏi phần cứng mạnh mẽ và thời gian tính toán dài, đặc biệt khi phân tích các khuôn có hình dạng chi tiết [10]. Cuối cùng, kết quả mô phỏng phụ

thuộc nhiều vào chất lượng dữ liệu đầu vào, chẳng hạn như đặc tính vật liệu và điều kiện biên [13].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

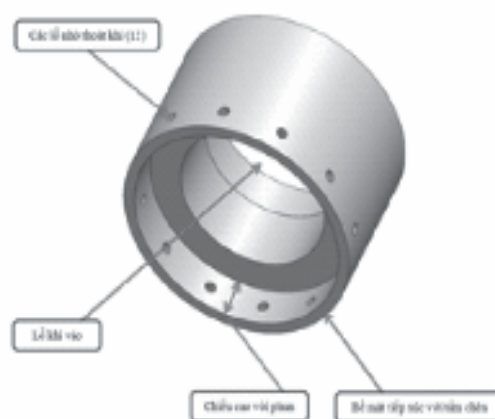
Trong công nghệ ép phun, kiểm soát nhiệt độ khuôn là yếu tố quan trọng nhằm đảm bảo chất lượng sản phẩm và rút ngắn chu kỳ sản xuất. Nhiều phương pháp gia nhiệt đã được nghiên cứu như: tia hồng ngoại, laser, cảm ứng, lửa trực tiếp và khí nóng. Trong đó, gia nhiệt bằng khí nóng nổi bật nhờ khả năng làm nóng nhanh, linh hoạt và chi phí thấp. Tuy nhiên, thách thức lớn là kiểm soát phân bố nhiệt đồng đều trong khuôn, đặc biệt với khuôn có hình dạng phức tạp. Để tối ưu hóa hiệu quả gia nhiệt, việc thiết kế hệ thống dẫn khí, chọn thông số vận hành và vật liệu khuôn phù hợp là rất cần thiết. Phần mềm ANSYS được sử dụng như một công cụ mô phỏng mạnh mẽ để phân tích quá trình truyền nhiệt, giúp đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến nhiệt độ phân bố. Qua đó, hỗ trợ thiết kế và tối ưu hệ thống gia nhiệt bằng khí trong ép phun hiện đại.

3. MÔ PHỎNG

Trong các quy trình gia nhiệt công nghiệp, việc kiểm soát và tối ưu hóa phân bố nhiệt độ trên bề mặt vật liệu đóng vai trò quan trọng để đảm bảo chất lượng sản phẩm. Một trong những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình này là thiết kế của nắp khí, được sử dụng để dẫn khí nóng đến bề mặt vật liệu cần gia nhiệt. Nội dung bài viết này tập trung vào phân tích thiết kế nắp khí, ứng dụng của nó trong quá trình làm nóng, và đánh giá phân bố nhiệt độ trên tấm chèn thông qua các thí nghiệm thực tế. Các hình minh họa, bao gồm Hình 3.1 và Hình 3.2, được sử dụng để làm rõ các khía cạnh kỹ thuật của thiết kế và kết quả thí nghiệm.

(*) Thiết kế của nắp khí

Thiết kế của nắp khí được trình bày chi tiết trong Hình 3.1. Nắp khí được thiết kế với mục tiêu tối ưu hóa luồng khí nóng phun lên bề mặt tấm chèn, đảm bảo phân bố nhiệt độ đồng đều và hiệu quả năng lượng cao. Cấu trúc của nắp khí bao gồm một hệ thống các lỗ phun được bố trí theo mô hình cụ thể, cho phép khí nóng được phân phối đều trên bề mặt vật liệu. Kích thước và số lượng lỗ phun, cũng như khoảng cách từ nắp khí đến tấm chèn (gọi là khoảng cách phun), là các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hiệu suất gia nhiệt.



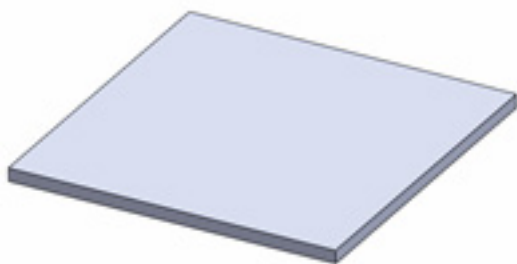
Hình 3.1. Thiết kế nắp chụp khí

Trong thiết kế được mô tả ở Hình 3.1, nắp khí có độ dày cố định là 2 mm, được chế tạo từ vật liệu chịu nhiệt để đảm bảo độ bền trong điều kiện nhiệt độ cao. Các lỗ phun được bố trí theo lưới hình học, với đường kính lỗ và khoảng cách giữa các lỗ được tính toán cẩn thận để tối ưu hóa luồng khí. Thiết kế này không chỉ giúp tăng cường hiệu quả truyền nhiệt mà còn giảm thiểu tổn thất năng lượng trong quá trình làm nóng. Hình 3.1 cung cấp cái nhìn trực quan về cấu trúc nắp khí, bao gồm các thông số kỹ thuật chính như kích thước lỗ, số lượng lỗ, và hình dạng tổng thể của nắp. 

(*) Thiết kế và đặc điểm của tấm chèn

Tấm chèn, như được mô tả trong Hình 3.2, là đối tượng chính được gia nhiệt trong thí nghiệm. Tấm chèn có kích thước mặt phẳng là 50 x 50 mm, với độ dày thay đổi từ 2 mm đến 10 mm, tùy thuộc vào yêu cầu cụ thể của từng thí nghiệm. Vật liệu chế tạo tấm chèn được lựa chọn dựa trên khả năng dẫn nhiệt và độ bền ở nhiệt độ cao, nhằm đảm bảo rằng tấm có thể chịu được các điều kiện khắc nghiệt trong quá trình gia nhiệt mà không bị biến dạng hoặc hư hỏng.

Hình 3.2 minh họa chi tiết cấu trúc của tấm chèn, bao gồm các kích thước hình học và vị trí bề mặt tiếp xúc với luồng khí nóng từ nắp khí. Bề mặt tấm chèn được gia công phẳng để đảm bảo tiếp xúc tối ưu với luồng khí, từ đó cải thiện hiệu quả truyền nhiệt. Độ dày của tấm chèn là một yếu tố quan trọng, vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ truyền nhiệt từ bề mặt tiếp xúc vào bên trong vật liệu. Các tấm chèn với độ dày khác nhau được sử dụng trong thí nghiệm để đánh giá tác động của yếu tố này lên sự phân bố nhiệt độ.



Hình 3.2. Thiết kế tấm chèn

(*) Thí nghiệm và phân tích phân bố nhiệt độ

Để đánh giá hiệu quả của thiết kế nắp khí và tác động của các thông số vận hành lên quá trình gia nhiệt, một loạt thí nghiệm đã được tiến hành. Các thí nghiệm tập trung vào việc phân tích sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt tấm

chèn trong các điều kiện khác nhau, bao gồm khoảng cách phun, thời gian gia nhiệt, chiều cao nắp khí, số lượng lỗ phun, và độ dày của tấm chèn. Các thông số chính của thí nghiệm bao gồm:

- Nhiệt độ đầu vào của khí nóng: Dao động từ 400°C đến 480°C, đại diện cho các điều kiện nhiệt độ cao thường gặp trong các ứng dụng công nghiệp.
- Thời gian gia nhiệt: Từ 10 đến 30 giây, cho phép đánh giá sự thay đổi của phân bố nhiệt độ theo thời gian.
- Độ dày tấm chèn: Thay đổi từ 2 mm đến 10 mm, nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của độ dày đến hiệu quả truyền nhiệt.
- Khoảng cách phun: Khoảng cách giữa nắp khí và bề mặt tấm chèn được điều chỉnh để xác định giá trị tối ưu.
- Số lượng lỗ phun: Các cấu hình nắp khí với số lượng lỗ khác nhau được thử nghiệm để đánh giá tác động đến luồng khí và phân bố nhiệt.

Trong quá trình thí nghiệm, các cảm biến nhiệt độ được bố trí trên bề mặt tấm chèn để ghi lại dữ liệu về sự phân bố nhiệt độ. Kết quả cho thấy rằng các thông số như khoảng cách phun và số lượng lỗ phun có ảnh hưởng đáng kể đến tính đồng đều của nhiệt độ trên bề mặt tấm chèn. Ví dụ, khi khoảng cách phun quá nhỏ, luồng khí nóng có thể tập trung quá mức vào một khu vực, dẫn đến hiện tượng nóng cục bộ. Ngược lại, khi khoảng cách phun quá lớn, hiệu quả truyền nhiệt giảm do sự phân tán của luồng khí.

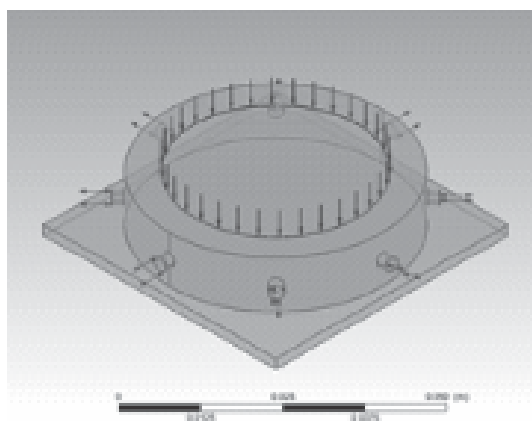
Thời gian gia nhiệt cũng là một yếu tố quan trọng. Với các tấm chèn mỏng (2 mm),

hiệt độ bề mặt tăng nhanh trong 10 giây đầu tiên, nhưng với các tấm dày hơn (10 mm), cần thời gian dài hơn để đạt được sự phân bố nhiệt độ đồng đều. Các kết quả này được minh họa rõ ràng thông qua các biểu đồ nhiệt độ thu thập từ thí nghiệm, mặc dù không được trình bày trực tiếp trong bài viết này.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

(*) Mô phỏng phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn sử dụng phần mềm ANSYS

Trong các quy trình gia nhiệt công nghiệp, việc nghiên cứu và dự đoán phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa quy trình sản xuất. Để đạt được mục tiêu này, một mô hình mô phỏng chi tiết đã được xây dựng, tập trung vào việc phân tích quá trình truyền nhiệt trong hệ thống bao gồm tấm chèn và luồng khí nóng. Mô hình được đơn giản hóa bằng cách sử dụng một lớp cách nhiệt bao quanh vùng gia nhiệt, giúp tập trung vào hai thành phần chính: tấm chèn và khí nóng. Các hình minh họa từ Hình 4.1 đến Hình 4.8 được sử dụng để trình bày các khía cạnh kỹ thuật của mô hình, từ điều kiện biên, chia lưới, đến kết quả mô phỏng.



Hình 4.1. Thiết lập đầu vào và đầu ra cho không khí trong phần mềm ANSYS để mô phỏng

(*) Thiết lập mô hình và điều kiện biên

Mô hình mô phỏng được xây dựng với mục tiêu tái hiện chính xác quá trình gia nhiệt Ex-GMTC, trong đó điều kiện biên đóng vai trò quan trọng để đảm bảo tính chân thực của kết quả. Hình 4.1 mô tả chi tiết các điều kiện biên, bao gồm thiết lập đầu vào và đầu ra cho luồng khí nóng trong phần mềm ANSYS. Nhiệt độ môi trường được đặt ở mức 25°C, với hệ số truyền nhiệt là 10 W/m²K. Tất cả các bề mặt bên ngoài của mô hình được giả định đối lưu tự do vào không khí, đây là phương thức truyền nhiệt chính cho các bề mặt không tiếp xúc trực tiếp với luồng khí nóng. Nhiệt độ đầu vào của khí được thiết lập trong khoảng từ 400°C đến 480°C, tương ứng với các điều kiện thực tế trong thí nghiệm.

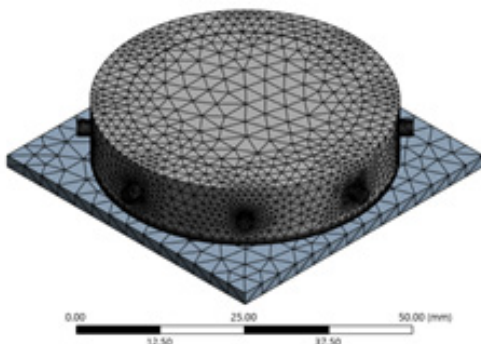
Việc thiết lập điều kiện biên như trong Hình 4.1 không chỉ giúp tái tạo các thông số vận hành thực tế mà còn đảm bảo rằng mô hình mô phỏng phản ánh đúng các đặc trưng vật lý của quá trình gia nhiệt. Các thông số này được nhập vào phần mềm ANSYS để thực hiện các phép tính phức tạp, từ đó cung cấp dữ liệu về sự phân bố nhiệt độ trên tấm chèn.

(*) Mô hình chia lưới

Để đảm bảo độ chính xác của mô phỏng, việc xây dựng lưới tính toán (meshing) là một bước quan trọng. Hình 4.2 trình bày mô hình chia lưới được thực hiện trên phần mềm ANSYS. Phần lưới của tấm chèn được tạo ra chủ yếu bằng các phần tử Hex, một loại phần tử có khả năng mô phỏng chính xác các đặc trưng hình học và vật lý của vật liệu. Để cải thiện độ chính xác tại các vùng tiếp xúc giữa tấm chèn và luồng khí nóng, 10 lớp lưới mỏng được áp dụng cho các bề mặt tiếp xúc theo phương pháp lưới phân lớp (boundary layer meshing).



Ngoài ra, một phần tử hình trụ được sử dụng để đại diện cho thể tích khí nóng trong mô hình. Phần tử này giúp mô phỏng chính xác sự chuyển động và truyền nhiệt của luồng khí từ đầu vào đến đầu ra. Hình 4.2 cung cấp cái nhìn trực quan về cấu trúc lưới, bao gồm sự phân bố các phần tử trên tấm chèn và vùng khí, đảm bảo rằng các phép tính số được thực hiện với độ chính xác cao.



Hình 4.2. Mô hình chia lưới trên phần mềm ANSYS

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình lưới được sử dụng để đánh giá bước làm nóng với nhiệt độ khí nóng đặt ở 400°C và thời gian làm nóng là 10 giây. Để tìm điều kiện tốt nhất cho quá trình làm nóng, thay đổi điều kiện nắp khí khác nhau đã được thử nghiệm. Kết quả cho thấy nhiệt độ tối đa đạt được tại khoảng cách phun ngắn hơn, cải thiện khả năng hấp thụ nhiệt của tấm chèn. Mặt khác, các khoảng cách phun 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 phun ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ và phân bố nhiệt trên tấm chèn.

Từ các trường hợp mô phỏng trình bày ở Bảng 1, giá trị nhiệt độ tối ưu nhất khi khoảng

cách phun gần với tấm chèn và khi khoảng cách phun thay đổi tăng lên thì nhiệt độ sẽ phân bố đều hơn so với phun gần. Việc này cho thấy việc điều chỉnh các tham số đem lại hiệu quả gia nhiệt tối ưu nhất.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình lưới được sử dụng để đánh giá bước làm nóng với nhiệt độ khí nóng đặt ở 400°C và thời gian làm nóng là 10 giây. Để tìm điều kiện tốt nhất cho quá trình làm nóng, thay đổi điều kiện nắp khí khác nhau đã được thử nghiệm. Kết quả cho thấy nhiệt độ tối đa đạt được tại khoảng cách phun ngắn hơn, cải thiện khả năng hấp thụ nhiệt của tấm chèn. Mặt khác, các khoảng cách phun 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 phun ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ và phân bố nhiệt trên tấm chèn.

Từ các trường hợp mô phỏng trình bày ở Bảng 1, giá trị nhiệt độ tối ưu nhất khi khoảng cách phun gần với tấm chèn và khi khoảng cách phun thay đổi tăng lên thì nhiệt độ sẽ phân bố đều hơn so với phun gần. Việc này cho thấy việc điều chỉnh các tham số đem lại hiệu quả gia nhiệt tối ưu nhất.

Bảng 1. Bảng thông số kết quả của quá trình mô phỏng

STT	1-E ($^{\circ}\text{C}$)	2-D (mm)	3-C (lỗ)	4-B (giây)	5-A (mm)	S1 ($^{\circ}\text{C}$)
1	400	5	2	10	2	155,14
2	400	10	4	15	4	121,10
3	400	15	6	20	6	101,01
4	400	20	8	25	8	113,50
5	400	25	10	30	10	131,89

Kết quả mô phỏng cung cấp thông tin chi tiết về sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt tấm chèn, được minh họa qua các hình từ Hình 5.3 đến Hình 5.8. Cụ thể, Hình 4.3 cho thấy sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí khác nhau trên bề mặt tấm chèn, được biểu diễn theo các đường dọc theo trục tọa độ xOy. Biểu đồ này giúp các nhà nghiên cứu đánh giá mức độ đồng đều của nhiệt độ trên bề mặt, từ đó xác định các vùng có nguy cơ quá nhiệt hoặc nhiệt độ không đủ.

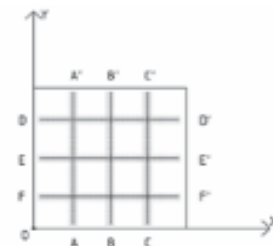
Để nghiên cứu tác động của số lượng lỗ thoát khí trên nắp khí đến phân bố nhiệt độ, một loạt mô phỏng đã được thực hiện với các cấu hình khác nhau, từ 2 đến 10 lỗ thoát khí. Các kết quả tương ứng được trình bày trong Hình 5.4 (10 lỗ thoát khí), Hình 5.5 (8 lỗ thoát khí), Hình 5.6 (6 lỗ thoát khí), Hình 5.7 (4 lỗ thoát khí), và Hình 5.8 (2 lỗ thoát khí). Các hình này minh họa sự khác biệt rõ rệt trong phân bố nhiệt độ khi số lượng lỗ thoát khí thay đổi.

Cụ thể, với cấu hình 10 lỗ thoát khí (Hình 5.4), nhiệt độ trên bề mặt tấm chèn được phân bố đồng đều hơn, do luồng khí nóng được phân tán tốt hơn. Ngược lại, khi số lượng lỗ giảm xuống còn 2 (Hình 5.8), hiện tượng tập trung nhiệt độ cục bộ xuất hiện, dẫn đến sự không đồng đều trong phân bố nhiệt. Các cấu hình với 8, 6, và 4 lỗ thoát khí (Hình 5.5, Hình 5.6, Hình 5.7) thể hiện mức độ trung gian, cung cấp dữ liệu để so sánh và tối ưu hóa thiết kế nắp khí.

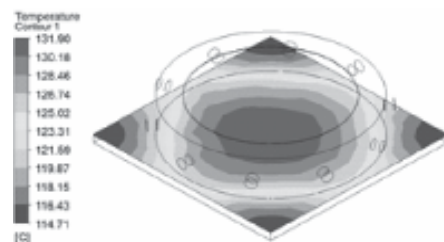
Mô phỏng sử dụng phần mềm ANSYS, như được minh họa qua các hình từ Hình 5.1 đến Hình 5.8, không chỉ giúp tái hiện chính xác quá trình gia nhiệt mà còn cung cấp cơ sở để tối ưu hóa thiết kế hệ thống. Việc phân tích sự phân bố nhiệt độ trên tấm chèn cho phép các kỹ sư xác định cấu hình nắp khí phù hợp, chẳng hạn như số lượng lỗ thoát khí tối ưu, để đạt được hiệu suất gia nhiệt cao nhất. Ngoài ra, mô

hình này có thể được mở rộng để áp dụng trong các quy trình công nghiệp khác, chẳng hạn như xử lý nhiệt kim loại, sản xuất linh kiện điện tử, hoặc gia công vật liệu composite.

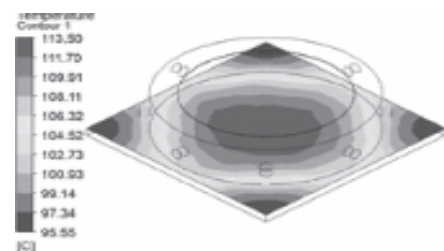
Kết quả từ các mô phỏng cũng đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu chi phí thí nghiệm thực tế. Thay vì thực hiện nhiều thử nghiệm với các cấu hình khác nhau, các nhà nghiên cứu có thể sử dụng mô hình ANSYS để dự đoán hiệu suất của hệ thống trong các điều kiện vận hành khác nhau. Điều này không chỉ tiết kiệm thời gian mà còn giúp đẩy nhanh quá trình phát triển và triển khai các giải pháp công nghệ mới.



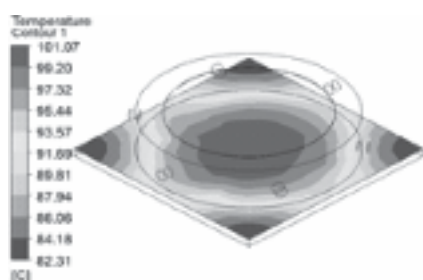
Hình 5.3. Sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí trên từng đường dọc theo trục tọa độ xOy



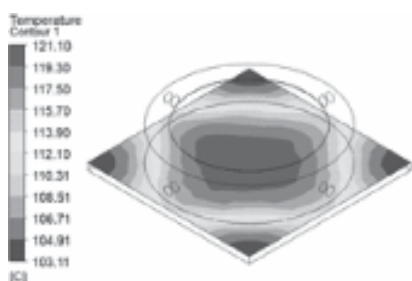
Hình 5.4. Hình ảnh kết quả mô phỏng ANSYS 10 lỗ thoát khí



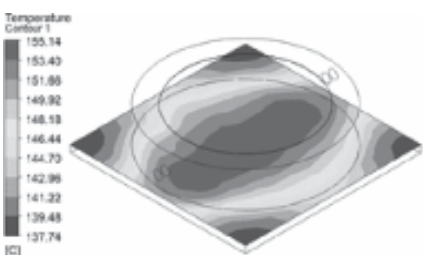
Hình 5.5. Hình ảnh kết quả mô phỏng ANSYS 8 lỗ thoát khí



Hình 5.6. Hình ảnh kết quả mô phỏng ANSYS 6 lỗ thoát khí



Hình 5.7. Hình ảnh kết quả mô phỏng ANSYS 4 lỗ thoát khí



Hình 5.8. Hình ảnh kết quả mô phỏng ANSYS 2 lỗ thoát khí

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 của các sản phẩm từ ép phun, nghiên cứu này đã tiến hành các tính toán và mô phỏng độc lập từng điều kiện của nắp chụp khí. Một loạt các loại nắp khí đã được thiết với các kích thước cố định: đường kính lỗ đầu vào là 35 mm, đường kính lỗ ra cố định là 3 mm và có 10 lỗ ra khí. Khoảng cách

giữa các lỗ vào và ra cũng được giữ ở mức 36° trên mỗi lỗ. Mô phỏng cho thấy nhiệt độ đạt được tối ưu nhất ở điều kiện chiều cao phun nhỏ, tuy nhiên khi chiều cao phun khí tăng lên thì nhiệt độ của tấm chèn đồng đều hơn. Việc ứng dụng ANSYS để đánh giá kết quả gia nhiệt cho lòng khuôn đem lại hiệu quả cao và tối ưu năng suất làm việc.

(*) 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: Cao Hoàng Thông, Trần Thanh Thương, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy.

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: SV2025-337.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**

Ngày phản biện: **22/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. 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, 1174-1180. <https://doi.org/10.1002/app.23446>
- [2]. Yao, D., Kimerling, T. E., & Kim, B. (2006), "High-frequency proximity heating for injection molding applications". Polymer Engineering & Science, 46, 938-945. <https://doi.org/10.1002/polb.20446>

doi.org/10.1002/pen.20566

- [3]. Li, X. P., Wang, G., & Guan, Y. J. (2010), "Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding process, respectively, with steam heating and electric heating". *Materials & Design*, 31, 4720-4730. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.039>
- [4]. Poszwa, P., Muszyński, P., & Mrozek, K. (2020), "Numerical study on the influence of RHCM on the basic parameters of filling the cavity". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 30, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.002>
- [5]. Li, J., Li, T., Xu, F., & Jiang, S. (2019), "A quantitative evaluation of the appearance quality of weld lines in RHCM parts". *Emerging Materials Research*, 8, 253-257. <https://doi.org/10.1680/jemmr.18.00128>
- [6]. Chen, S. C., Chiu, C. H., & Tsai, K. C. (2009), "Effect of cavity surface coating on mold temperature variation and the quality of injection molded parts". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5646-5653. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.07.016>
- [7]. Kitayama, S., Ishizuki, R., Takano, M., Kubo, Y., & Aiba, S. (2019), "Optimization of mold temperature profile and process parameters for weld line reduction and short cycle time in rapid heat cycle molding". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 1735-1744. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03567-3>
- [8]. Sánchez, R., Martínez, A., Mercado, D., Carbonel, A., & Aisa, J. (2021), "Rapid heating injection moulding: An experimental surface temperature study". *Polymer Testing*, 93, 106928. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106928>
- [9]. Chen, S. C., Chiu, C. H., & Tsai, K. C. (2009), "Effect of cavity surface coating on mold temperature variation and the quality of injection molded parts". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 965-970. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.012>
- [10]. Lin, Y. W., Tsai, K. C., & Chen, S. C. (2009), "Mold temperature variation for assisting micro molding of DVD micro-featured substrate and dummy using pulsed-cooling". *Sensors and Actuators A: Physical*, 152(2), 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.04.019>
- [11]. Chen, S. C., Jong, W. R., & Hsu, H. T. (2009), "Optimal design of heating channels for rapid heating cycles injection mold based on response surface and genetic algorithm". *Materials & Design*, 30, 4629-4639. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.048>
- [12]. 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. (2022), "Potential of rapid tooling in rapid heat cycle molding: A review". *Materials*, 15, 3725. <https://doi.org/10.3390/ma15103725>
- [13]. Wang, G. L., Yao, D., & Kimerling, T. E. (2005), "3D numerical simulation of transient temperature field for lens mold embedded with heater". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32, 1192-1200. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.06.011>
- [14]. 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.00000000019>
- [15]. Zhao, G., Wang, G., Guan, Y., & Li, H. (2011), "Research and application of a new rapid heat cycle molding with electric heating and coolant cooling to improve the surface quality of large LCD TV panels". *Polymer Advanced Technologies*, 22, 476-487. <https://doi.org/10.1002/pat.1551>

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO THIẾT BỊ GIA CÔNG LỖ TÂM, PHỤC VỤ GIA CÔNG CHI TIẾT DẠNG TRỤC

DESIGN AND MANUFACTURE OF CENTER HOLE MACHINING EQUIPMENT,
SERVING THE PROCESSING OF SHAFT SHAPED PARTS

Lê Thái Sơn, Nguyễn Hữu Ngoạn
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu, phân tích thiết kế mô hình máy phay mặt đầu, khoan lỗ tâm trong gia công chi tiết trục nhằm mục tiêu nâng cao độ chính xác gia công của sản phẩm, tăng năng suất lao động, tiết kiệm chi phí sản xuất phục các trường học, nhà máy, doanh nghiệp.

Từ khoá: Lỗ tâm; Khoan lỗ; Mũi tâm cố định; Mũi tâm quay; Mũi tâm khía nhám.

ABSTRACT

The article introduces the results of research, analysis and design of face milling machine model, center hole drilling in shaft machining with the aim of improving product machining accuracy, increasing labor productivity, saving production costs for schools, factories and businesses.

Keywords: Center hole; Hole drilling; Fixed center bit; Rotating center bit; Roughing center bit.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ở các chi tiết dạng trục, độ đồng tâm giữa các cổ trục là rất quan trọng. Để đảm bảo yêu cầu này, khi gia công trục cần phải dùng chuẩn tinh thống nhất. Chuẩn tinh thống nhất khi gia công chi tiết dạng trục là hai lỗ tâm ở hai đầu trục. Như vậy, lỗ tâm có quyết định rất lớn đến độ chính xác gia công chi tiết trục cũng như việc sử dụng để phục hồi lại chi tiết trục trong quá trình sử dụng.

Khi gia công trục dài trung bình $4 \leq l/d \leq 10$ hoặc trục dài có $l/d > 10$ (trong đó d là đường kính và l là chiều dài trục) thường phải công tâm khi gia công [2], có trường

hợp không cần khoan lỗ tâm khi ta dùng mũi côn ngược để gá nhưng phương pháp này năng suất không cao, độ đồng tâm của trục không lớn [1]. Khi gia công trục dài để sử dụng chuẩn tinh thống nhất bắt buộc phải phay mặt đầu và khoan lỗ tâm trên trục [3]. Trong sản xuất lớn nếu gia công lỗ tâm trên máy tiện, máy phay hoặc máy khoan đều cho độ chính xác không cao, năng suất thấp. Việc sử dụng máy khoan mặt, khoan tâm để gia công lỗ tâm sẽ cho năng suất cao, độ chính xác lớn. Để nâng cao năng suất lao động, hạ giá thành sản phẩm, việc thiết kế và chế tạo máy phay mặt đầu, khoan lỗ tâm là yêu cầu cần thiết, có ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn [4].

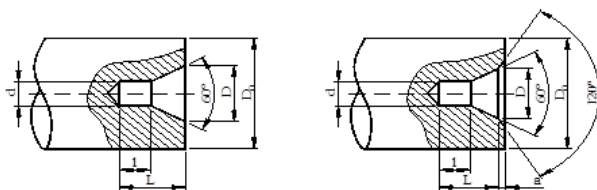
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng điều kiện thiết kế, mô phỏng

Để thiết kế, chế tạo thiết bị phay mặt đầu và khoan lỗ tâm có hình dáng như hình 1, ta sử dụng phần mềm Pro/Engineer. Phần mềm này có tính năng ưu việt như:

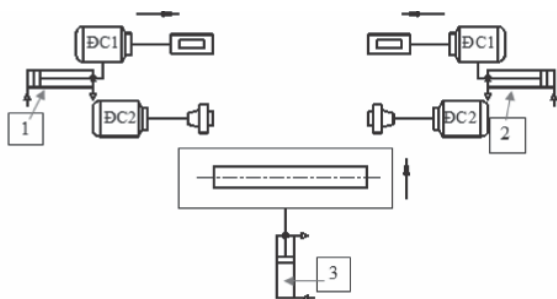
Pro/Engineer là phần mềm của hãng Parametric Technology, Corp là một phần mềm thiết kế theo tham số, có nhiều tính năng rất mạnh trong lĩnh vực CAD/CAM/CAE đảm bảo khả năng:

- Mô hình hóa trực tiếp vật thể rắn;
- Tạo các mô đun bằng các khái niệm và phân tử thiết kế;
- Thiết kế tham số;
- Sử dụng cơ sở dữ liệu thống nhất;
- Có khả năng mô phỏng động học, động lực học kết cấu cơ khí.



Hình 1. Kết cấu lỗ tâm [4]

Sau khi phân tích các số liệu trên hình [1] chọn được mô hình thiết kế trên hình [2]:



Hình 2. Sơ đồ kết cấu động học của thiết bị phay mặt đầu và khoan lỗ tâm

Động cơ ĐC1 làm quay mũi khoan thực hiện chuyển động cắt khi khoan. Chuyển động tịnh tiến của mũi khoan được thực hiện nhờ hai xi lanh khí nén 1 và 2 mang ĐC1 có gắn cỡ hành trình. Động cơ ĐC2 dẫn động dao phay, thực hiện chuyển động cắt khi phay được điều chỉnh theo chiều dài của phôi. Chuyển động mang phôi vào ra được thực hiện nhờ xi lanh khí nén 3 có gắn cỡ hành trình.

Khi gia công, phôi được gá đặt tại vị trí ban đầu như hình vẽ. Các động cơ ĐC1 và ĐC2 được khởi động. Xi lanh 3 mang bàn máy và phôi dịch chuyển đến vị trí dao phay để phay mặt đầu, sau đó tiếp tục di chuyển đến vị trí của hai mũi khoan tâm. Hai mũi khoan tiến vào khoan tâm, đến khi đạt chiều sâu cần tiết thì lùi về vị trí cũ. Bàn máy mang phôi lùi về vị trí ban đầu và tháo chi tiết.

2.2. Kết quả thiết kế, mô phỏng

Với kích thước phôi lớn nhất $D_{\max} = 30\text{mm}$, các kích thước của lỗ tâm là: $d = 2,5$; $D \leq 6$; $L = 6$; $l \leq 3$ [3]. Từ sơ đồ kết cấu động học ở hình 2, máy có hai chuyển động chính: Chuyển động quay của dao phay và chuyển động quay của mũi khoan. Để thực hiện hai chuyển động này, ta cần dùng động cơ điện một chiều truyền qua bộ truyền đai đến trục chính.

Theo tính toán, số vòng quay giới hạn của dao phay là $103 \div 173$ vòng/phút; công suất cắt cực đại là $0,3 \text{ kW}$, ta nhận được kết quả như sau:

Đường kính trục phay:

$$d_B \geq \sqrt[3]{\frac{M_t}{0,1[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{14664}{0,1,70}} = 12,70 \text{ (mm)}$$



Đường kính trục khoan: $d \geq \sqrt[3]{\frac{M_x}{0,2[\tau]}}$,

với trục thép C45 có thể lấy $[\tau] = 30 \text{ N/mm}^2$:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{20600}{0,2 \cdot 30}} = 15,08 \text{ (mm)}$$

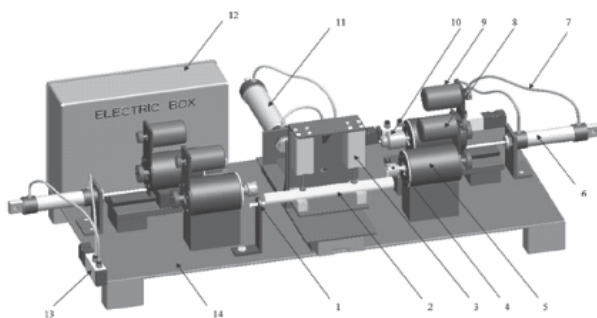
Do hai dao phay ở hai đầu phôi quay ngược chiều nhau nên mô men xoắn tác dụng lên phôi sẽ cân bằng nhau. Do đó, việc tính toán lực kẹp ở đây chủ yếu để chống lại khả năng trượt phôi do lực cắt theo phương chạy dao trong quá trình cắt.

Khi chọn xy lanh có đường kính trong $d = 10 \text{ mm}$, thay vào công thức:

$$p = \frac{W}{\pi d^2 / 4} = \frac{170}{\pi 10^2 / 4} = 2,16 \text{ (N/mm}^2\text{)} =$$

$$21,6 \text{ bar} = 2,16 \text{ MPa}$$

Như vậy, áp suất cần thiết cấp cho xy lanh kẹp phôi là 2,16 MPa. Tương tự, ta tính toán được áp suất của các xi lanh chạy dao khi phay và chạy dao khi khoan với $d = 20 \text{ mm}$. Do dùng một nguồn khí nén cung cấp cho cả ba xy lanh nên chọn áp suất cấp cho hệ thống là áp suất lớn nhất trong ba áp suất trên $p = 8,37 \text{ MPa}$ [6]. Ở đường vào các xy lanh làm việc áp suất thấp hơn ta dùng van giảm áp.

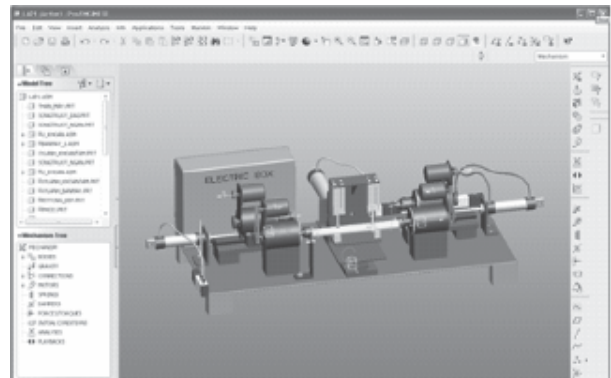


Hình 3. Mô hình mô phỏng:

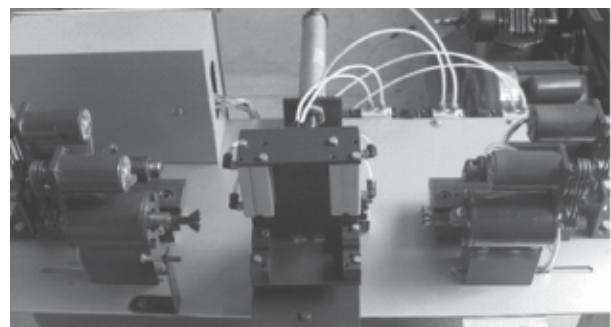
1. Cữ hành trình; 2. Phôi; 3. Xy lanh kẹp phôi; 4. Dao phay; 5. Gối trục phay; 6. Xi lanh tịnh tiến mũi khoan; 7. Ống dẫn khí; 8. Động cơ phay; 9. Động cơ khoan; 10. Đầu khoan; 11. Xi lanh tịnh tiến bàn máy; 12. Hộp điều khiển; 13. Công tắc nguồn; 14. Thân máy

2.3. Xử lý số liệu và thảo luận kết quả

Trên cơ sở mô hình đã tính toán thiết kế, chúng tôi đã xây dựng được mô hình máy phay khoan lỗ tâm [4] trong mô đun Part và Assembly và tiến hành mô phỏng trong Mechanism Design. Các đối tượng tạo trong chế độ Part được sử dụng trong các ứng dụng tiếp theo, có thể chế độ Drawing hay Manufacturing. Assembly cho phép tích hợp các thành phần thiết kế vào một mẫu thiết kế cuối cùng. Mechanism Design sẽ phối hợp để gia công các sản phẩm hoàn thiện trên các máy CNC. Nguyên tắc trong chế tạo máy [1] khi thiết kế, chế tạo máy thì độ chính xác của thiết bị phải chính xác cao hơn so với máy chế tạo phải từ 1-2 cấp. Nên việc chọn máy CNC để chế tạo máy phay mặt đầu và khoan lỗ tâm cần lưu ý đến vấn đề này.



Hình 4. Giao diện trong mô đun Mechanism



Hình 5. Mô hình máy phay mặt đầu và khoan lỗ tâm

3. KẾT LUẬN

Mô hình máy phay mặt đầu và khoan lỗ tâm đề xuất đã hoạt động đạt mục tiêu thiết kế, đưa vào ứng dụng làm mô hình giảng dạy tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh, đồng thời có thể ứng dụng trong thực tế sản xuất của doanh nghiệp, nhằm nâng cao độ chính xác, tăng năng suất lao động, tiết kiệm chi phí sản xuất. ❖

Ngày nhận bài: **02/6/2025**

Ngày phản biện: **12/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Ngọc Cẩn (2005), “*Thiết kế máy cắt kim loại – tập 2*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [2]. Lê Thái Sơn, Nguyễn Bá Thuận, Lương Hải Chung (2023), “*Nguyên lý cắt và Dụng cụ cắt*”. NXB. Thanh niên.
- [3]. Nguyễn Ngọc Đào, Trần Thế San, Hồ Viết Bình (2006), “*Chế độ cắt gia công cơ khí*”. NXB. Đà Nẵng.
- [4]. Lê Thái Sơn, Nguyễn Hữu Ngoạn, Ngô Văn Giang (2024), “*Nguyên lý, Chi tiết máy*”. NXB. Thanh niên.
- [5]. Trần Văn Địch và các tác giả khác (2008), “*Công nghệ chế tạo máy*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [6]. Nguyễn Ngọc Phương (1999), “*Hệ thống điều khiển bằng khí nén*”. NXB. Giáo dục.

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH KHÍ ĐỘNG MÁY BAY HAI CHỖ NGỒI

RESEARCH ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF TWO-SEAT AIRCRAFT

Hoàng Thị Kim Dung

Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

Email: dung.hoangthikim@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu đặc tính khí động của máy bay hai chỗ ngồi được thiết kế với tổng khối lượng 594 kg với dải góc tấn từ 5 đến 15 độ ở vận tốc 35,67 m/s. Nghiên cứu sử dụng phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm ANSYS. Kết quả khí động cho thấy chất lượng khí động đạt kết quả lớn nhất ở góc tấn vào khoảng 13 độ.

Từ khóa: Máy bay hai chỗ ngồi; Khí động; ANSYS.

ABSTRACT

The paper investigates the aerodynamic characteristics of a two-seat aircraft with a total mass of 594 kg, within an angle of attack range from 5 to 15 degrees, at a speed of 35.67 m/s. The study employs numerical simulation methods using ANSYS software. The aerodynamic results indicate that the aircraft achieves the highest aerodynamic quality at an angle of attack of approximately 13 degrees.

Keywords: Two-seat Aircraft; Aerodynamic; ANSYS.

1. GIỚI THIỆU

Với mục tiêu thiết kế máy bay hai chỗ ngồi, máy bay hai chỗ ngồi STOL CH 701, một loại máy bay nhẹ nổi tiếng với khả năng cất/hạ cánh trên đường băng ngắn (STOL – Short Take-Off and Landing), do kỹ sư hàng không người Canada Chris Heintz thiết kế từ năm 1986 được lựa chọn nghiên cứu. Máy bay STOL CH 701 có đặc điểm cánh có slat cố định giúp tăng lực nâng và giảm tốc độ cất cánh; Flaperons toàn cánh (kết hợp giữa flap và aileron) giúp kiểm soát tốt ở tốc độ thấp; Đuôi lái toàn phần

và thiết kế khung kim loại bền bỉ, dễ bảo trì; và có thể cất cánh chỉ sau khoảng 40 km/h, cần chưa đến 30 mét đường băng [1].

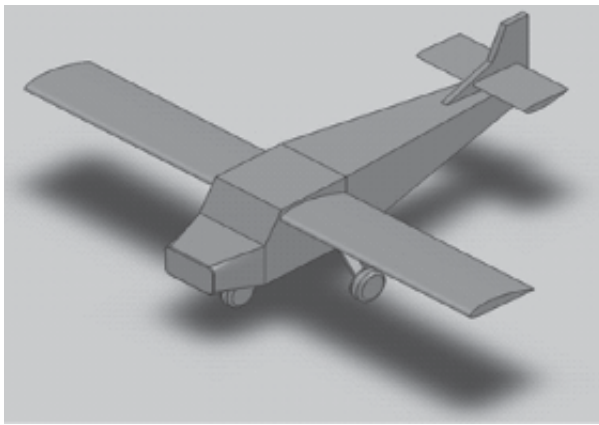
Máy bay STOL CH 701 đơn giản, có hình dạng khí động bên ngoài tương đối phù hợp với việc khảo sát đặc tính khí động, sử dụng NACA 4415 là loại profil cánh có hệ số chất lượng khí động tương đối cao và dễ chế tạo. Mô hình này đặc trưng tiêu biểu cho hầu hết các loại máy bay nhỏ hai chỗ ngồi, có dải hoạt động, tầm bay, khối lượng nằm trong dải hoạt động phổ biến của máy bay hai chỗ ngồi.

2. NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG

2.1. Mô hình máy bay

Máy bay hai chỗ ngồi được thiết kế dựa trên mẫu máy bay STOL CH 701 [2]. Mô hình máy bay được trình bày trong Hình 1 và các thông số chính của máy bay được tổng hợp trong Bảng 1.

Máy bay hai chỗ ngồi được nghiên cứu đặc tính khí động ở vận tốc 35,67 m/s ở trần bay 4 km với dải góc tấn từ 5 đến 15 độ.



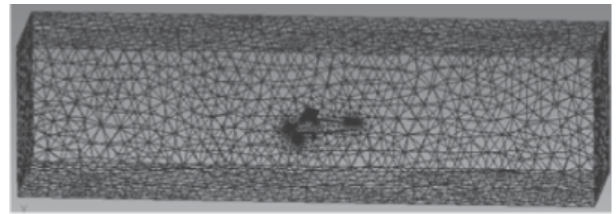
Hình 1. Mô hình máy bay

Bảng 1. Thông số chính của máy bay

Chiều dài	6,3 m
Chiều cao	2,64 m
Sải cánh	9,2 m
Chiều dài dây cung cánh chính	1,5 m
Biên dạng cánh chính	NACA4415
Sải đuôi ngang	2,2 m
Chiều dài dây cung đuôi ngang	0,79 m
Trọng lượng rỗng	326 kg
Khối lượng tổng thiết kế	594 kg
Tốc độ bay bằng	35,67 m/s
Động cơ	Continental O-200-100 Hp

2.2. Nghiên cứu mô phỏng

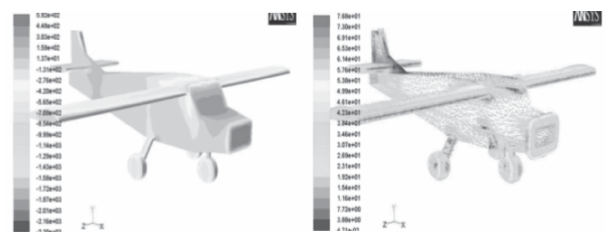
Mô hình máy bay hai chỗ ngồi được lưới hóa trong phần mềm ANSYS theo dạng không cấu trúc (lưới tứ diện) (Hình 2). Lưới được chia với số Orthogonal lớn hơn 0,25 và số Skewness nhỏ hơn 0,75. Lưới này được đánh giá có chất lượng tốt [3].



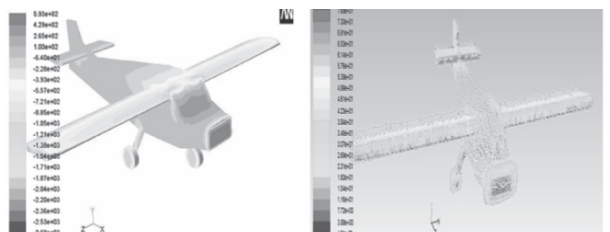
Hình 2. Chia lưới

Miền tính toán được mô hình hóa thành khối hình hộp chữ nhật với phía bên trái (Hình 2) là vận tốc dòng khí vào 35,67 m/s, phía bên phải là áp suất môi trường ở độ cao bay 4 km, bốn mặt xung quanh là tường trượt và trên mô hình máy bay là tường cứng.

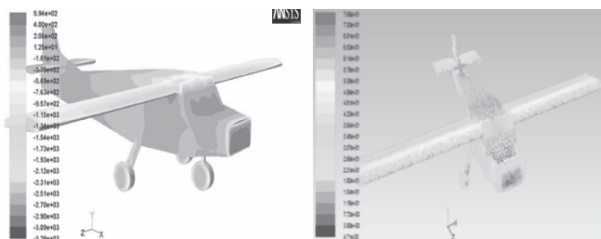
3. KẾT QUẢ



Góc tấn 5 độ



Góc tấn 9 độ



Góc tấn 13 độ

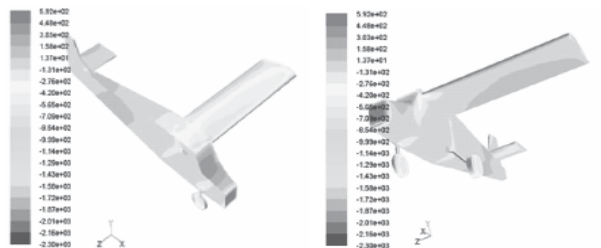
a. Phân bố áp suất

b. Trường vận tốc

Hình 3. Phân bố áp suất và trường vận tốc trên máy bay

Các điểm có áp suất nguy hiểm và lớn nhất (400 – 593 Pa) là các điểm nằm ở mép trước mũi máy bay (đã bỏ qua sự ảnh hưởng của quạt), mép vào của cánh, đuôi đứng, đuôi ngang, mép trước còng (Hình 3a). Bởi vì đây là các vị trí mà không khí tiếp xúc đầu tiên. Các vị trí này có vận tốc thường nhỏ và gần bằng 0 (Hình 3b), do vậy áp suất tập trung ở đây thường cao. Chính vì vậy, các máy bay cải tiến từ STOL CH 701 như STOL CH 750, 801 đều thiết kế có mũi máy bay thon tròn để giảm tập trung áp suất cao trên bề mặt.

Áp suất trên bề mặt cánh (Hình 4a) nhỏ hơn so với áp suất ở mặt dưới cánh (Hình 4b). Điều này rất hợp lý do cơ chế tạo lực nâng nhờ sự chênh lệch áp giữa mặt trên và dưới của máy bay.



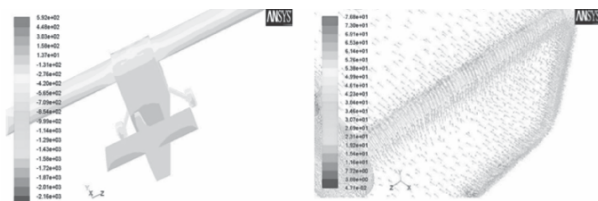
a. Mặt trên

b. Mặt dưới

Hình 4. Phân bố áp suất mặt trên và mặt dưới cánh

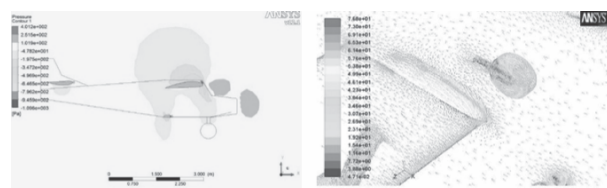
Áp suất tại mặt chuyển tiếp giữa mặt trước mũi máy bay (màu đỏ) lên mặt trước cabin (màu vàng) là dải màu xanh (thường vào khoảng -1250 Pa) (Hình 5a). Bởi khi dòng khí

chuyển động từ mũi lên mặt trên phía trước cabin có vận tốc trượt cao và tập trung rất nhiều ở đây (Hình 5b), do vậy áp suất tập trung thành một dải có độ lớn thấp và vòng quanh biên dạng mũi máy bay.



a. Áp suất mặt trên và sau đuôi b. Vận tốc trước mũi máy bay

Hình 5. Trường vận tốc trước mũi máy bay



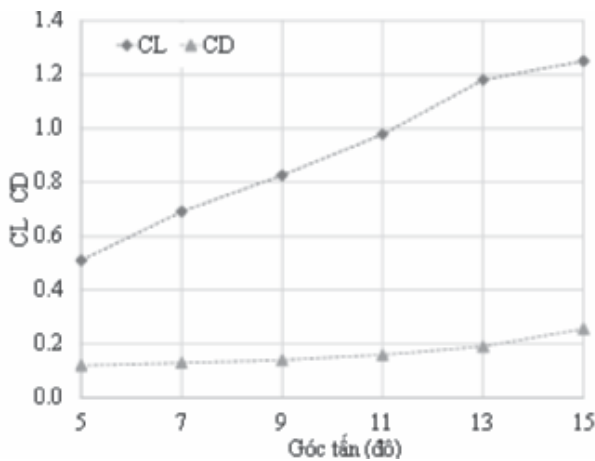
a. Trường áp suất

b. Trường vận tốc

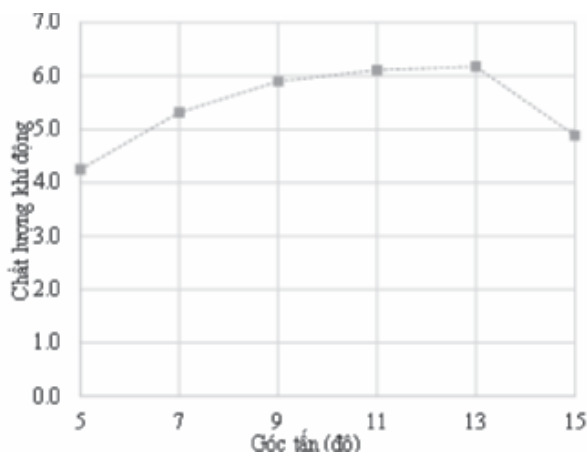
Hình 6. Trường vận tốc và áp suất giữa thân và cánh

Xét mặt cắt giữa thân và cánh là vị trí dòng khí bắt đầu đi vào vùng mặt cắt giữa thân và cánh. Từ Hình 6a, ta thấy trường áp suất thay đổi liên tục, dòng không khí chuyển động có xoáy và thường bị rối (các vector vận tốc chuyển động hỗn loạn, không suôn đều, Hình 6b), đây cũng được coi là tiết diện nguy hiểm nhất của máy bay và là vị trí tạo lực cản chòng chéo cho máy bay. Nguyên nhân là do tương tác giữa thân và cánh máy bay khi có dòng khí đi vào làm cho dòng khí chuyển động không đều gây ra các vùng có áp suất thay đổi đột ngột.

Khi góc tấn tăng từ 5 đến 15 độ, hệ số lực nâng (CL) và hệ số lực cản (CD). Trong đó, hệ số lực nâng tăng nhanh hơn nhiều so với sự tăng của hệ số lực cản. Chất lượng khí động tăng khi góc tấn tăng từ 5 đến 13 độ và sau đó giảm khá mạnh. Như vậy, chất lượng khí động đạt cực đại ở khoảng 13 độ.



a. CL và CD



b. Chất lượng khí động – CL/CD

Hình 7. Đặc tính khí động

4. KẾT LUẬN

Đặc tính khí động của máy bay hai chỗ ngồi được nghiên cứu mô phỏng sử dụng phần mềm ANSYS. Với dải góc tấn nghiên cứu, cả hệ số lực nâng và hệ số lực cản đều tăng khi góc tấn tăng nhưng hệ số lực cản tăng chậm hơn so với hệ số lực nâng. Chất lượng khí động đạt giá trị lớn nhất vào khoảng 13 độ. Như vậy cho phép khuyến cáo không tăng góc tấn sau 13 độ để không làm giảm hiệu quả của động cơ máy bay. ❖

Ngày nhận bài: 02/6/2025

Ngày phản biện: 16/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. <http://www.zenithair.com/stolch701/7-design.html>
- [2]. Anderson J. D. (1984), “*Fundamental of aerodynamics*”. McGraw-Hill book company.
- [3]. FLUENT UDF Manual.

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO GIÁ THỬ NGHIỆM ĐỘNG CƠ KHỞI ĐỘNG TRÊN XE XÍCH QUÂN SỰ HẠNG TRUNG

RESEARCH, DESIGN AND MANUFACTURING OF A TEST BENCH FOR STARTER
MOTOR IN MEDIUM-CLASS MILITARY TRACKED VEHICLES

Phạm Trung Kiên*, Nguyễn Minh Tiến

Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email: kienpt.hvkt@mta.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nội dung nghiên cứu, thiết kế, chế tạo giá thử động cơ điện khởi động trên động cơ của xe xích quân sự hạng trung. Dòng xe xích quân sự thế hệ trước đây vẫn còn được sử dụng, khai thác, sửa chữa để duy trì tình trạng kỹ thuật và sẵn sàng chiến đấu trong quân đội. Trong quá trình đào tạo, huấn luyện học viên ngành Tăng thiết giáp thì các mô hình, học cụ, các giá thử sẽ cung cấp cho học viên tính trực quan, khả năng tương tác và hiệu quả tiếp thu kiến thức rất cao. Do vậy, việc nghiên cứu thiết kế, chế tạo giá thử nghiệm động cơ khởi động nhằm giúp cho quá trình xác định tình trạng kỹ thuật cũng như nghiệm thu đánh giá chất lượng của động cơ khởi động một cách nhanh chóng, có định lượng, góp phần nâng cao quá trình đào tạo, huấn luyện, nâng cao năng lực thực hành và phục vụ nghiên cứu khoa học cho học viên.

Từ khóa: Động cơ khởi động; Cường độ dòng điện; Mô men cản khởi động.

ABSTRACT

This paper presents the research, design, and fabrication of a test bench for the electric starter motor used in the engine of medium-class military tracked vehicles. Previous-generation tracked vehicles are still in operation, maintenance, and repair to ensure technical readiness and combat capability within the armed forces. In the training and education of armored vehicle engineering students, the use of models, teaching aids, and test benches plays a crucial role in enhancing visual perception, interactivity, and knowledge acquisition. In response to practical demands, the development of a starter motor test bench contributes not only to the rapid and quantitative assessment of the starter motor's technical condition and performance but also to improving the quality of training, hands-on practice, and scientific research for students.

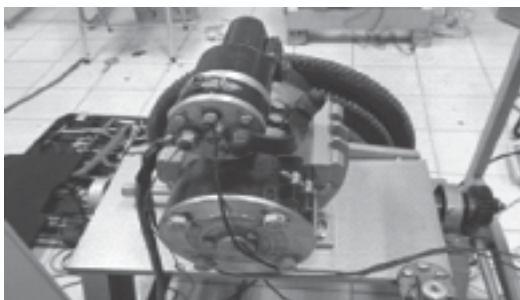
Keywords: Starter motor; Electric current; Starting resistance torque.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ điện khởi động CT-16M được trang bị trên các dòng xe xích quân sự hạng trung có công suất 6,5kW, điện áp 24V, dòng điện khởi động khoảng 200A đến 800A [3], [4]. Các thông số đánh giá tính năng làm việc của động cơ điện khởi động bao gồm: Mô men cản khởi động (mô men cản của động cơ đốt trong), cường độ dòng điện khi khởi động, tốc độ vòng quay của động cơ, giá trị sụt áp của điện áp khởi động mỗi lần khởi động. Việc nghiên cứu, thiết kế, chế tạo giá thử động cơ khởi động nhằm mục đích phục vụ quá trình đào tạo, giúp học viên hiểu được, làm được các bước kiểm tra, thử nghiệm, cũng như đánh giá tình trạng kỹ thuật của động cơ khởi động.

2. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

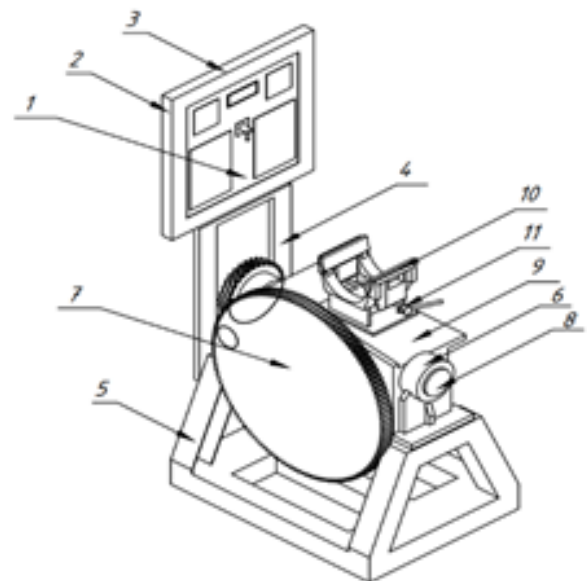
Động cơ khởi động gồm ba phần: động cơ điện khởi động, role gài khớp, và phần truyền động. Phần động cơ điện được chia ra làm nhiều loại theo kiểu đầu dây, phần truyền động phân theo cách truyền động của động cơ khởi động đến động cơ. Động cơ điện trong động cơ khởi động là loại mắc nối tiếp và hỗn hợp. Động cơ khởi động là cơ cấu sinh mômen quay và truyền cho bánh đà của động cơ đốt trong [3]. Để đánh giá được tình trạng kỹ thuật của động cơ khởi động thì cần phải chế tạo giá thử nghiệm.



Hình 1. Động cơ điện khởi động trên xe xích quân sự hạng trung

3. THIẾT KẾ GIÁ THỬ ĐỘNG CƠ KHỞI ĐỘNG

Trên cơ sở đặc tính làm việc của động cơ khởi động, tiến hành thiết kế sơ bộ 3D giá thử động cơ khởi động cho các xe xích quân sự hạng trung, mô hình 3D giá thử khởi động được trình bày như trên Hình 2.... Do kích thước, khối lượng, đặc tính làm việc của động cơ khởi động trên mỗi xe khác nhau nên mỗi loại động cơ khởi động cần có một giá đỡ kẹp phù hợp tương ứng.... [1], [2].



Hình 2. Thiết kế mô hình 3D giá thử động cơ khởi động cho xe xích quân sự hạng trung:

1. Các đồng hồ đo lường; 2. Bảng taplo; 3. Khung của bảng taplo; 4. Giá đỡ bảng taplo; 5. Chân giá; 6. Gối đỡ xoay; 7. Bánh đà; 8. Trục xoay; 9. Tấm đỡ giá khởi động; 10. Giá kẹp động cơ khởi động; 11. Trục điều chỉnh lực kẹp

Cấu tạo của giá đỡ bao gồm thân giá đỡ, bảng táp lô để lắp đặt các đồng hồ đo, bánh đà, giá kẹp khởi động, bộ tạo mô men cản khởi động, các đồng hồ đo lường theo các thông số yêu cầu. Các tín hiệu đo có kết nối với máy tính nhưng thông qua các mô đun đo. Mô men cản



khởi động có giá trị tính toán và chế tạo đảm bảo giá trị theo các loại động cơ của các xe xích quân sự hạng trung và được điều chỉnh tương ứng đối với từng động cơ khi thử nghiệm. Từ mô hình 3D sơ bộ của giá thử khởi động, tiến hành tính toán, lựa chọn và chế tạo các cụm của giá thử động cơ khởi động.

4. TÍNH TOÁN, LỰA CHỌN VÀ CHẾ TẠO GIÁ THỬ ĐỘNG CƠ KHỞI ĐỘNG

4.1. Tính toán, lựa chọn các thông số đo

Căn cứ trên các tài liệu chuyên ngành và các quy tiêu chuẩn nghiệm thu động cơ khởi động áp dụng cho các nhà máy sửa chữa xe tăng thiết giáp, tính toán và lựa chọn các thông số đo khi thử nghiệm động cơ khởi động, bao gồm: Mô men cản khởi động; tốc độ bánh đà; điện áp và cường độ dòng điện. Khoảng giá trị đo của các thông số cũng như độ chính xác, phương pháp được quy định theo tài liệu ngành [1], [2]. Lựa chọn các đồng hồ tương ứng với các thông số nêu trên. Các đồng hồ đo lường có tính năng hiển thị giá trị đo và có cổng tín hiệu ra để cấp cho các mô đun lường vào máy tính. Sơ đồ đấu nối các đồng hồ và tín hiệu cấp cho máy tính được trình bày trên Hình 3. Trên bảng táp lô (Hình 3), có bố trí thêm các nút khởi động, nút bấm tăng/giảm mô men cản khởi động (tương ứng cho từng động cơ khởi động vì có giá trị mô men cản khác nhau).



Hình 3. Bảng táp lô các thông số khi thử nghiệm động cơ điện khởi động

4.2. Thiết kế, chế tạo giá kẹp động cơ khởi động và bộ tạo mô men cản khởi động

Giá kẹp động cơ khởi động được chế tạo từ thép 45, có chức năng kẹp chặt và mở nhanh chóng, diện tích tiếp xúc lớn giữa thân giá kẹp và động cơ khởi động để đảm bảo lực kẹp. Hình 4 trình bày giá kẹp động cơ khởi động được lắp đặt trên thân của giá thử.



Hình 4. Giá kẹp động cơ khởi động

Các thông số yêu cầu bao gồm: độ đồng tâm của động cơ khởi động với vành răng khởi động của bánh đà, đảm bảo lực kẹp, khoảng cách của bánh răng trên động cơ khởi động với vành răng khởi động.... Trên tấm đỡ của giá kẹp khởi động có gia công 04 (bốn) lỗ để bắt chặt với thân giá thử động cơ khởi động.... Với mô men cản khởi động lớn nên cơ cấu tạo lực kẹp chặt động cơ khởi động cần có giá trị tương ứng để đảm bảo kẹp chặt động cơ khởi động trong khi thử nghiệm. Động cơ khởi động được kẹp chặt trên giá kẹp động cơ khởi động như đã trình bày trên Hình 1.

4.3. Lựa chọn cảm biến đo tốc độ quay của bánh đà và chế tạo đồ gá

Để đo giá trị tốc độ vòng quay của bánh đà, nhóm tác giả sử dụng cảm biến tốc độ encoder tương đối, lựa chọn encoder có giá trị đo và độ chính xác phù hợp với yêu cầu kỹ thuật ngành. Chế tạo đồ gá lắp đặt cảm biến tốc độ encoder lên bánh đà thông qua khớp nối

mềm. Khớp nối mềm tự lựa có tính năng tự lựa khi có sai lệch về độ đồng tâm giữa trục của cảm biến tốc độ encoder. Các dây dẫn tín hiệu của cảm biến tốc độ encoder được nối đến đồng hồ đo tốc độ trên bảng táp lô [1], [2]. Hình 5 trình bày lắp ráp cảm biến encoder đo tốc độ vòng quay của bánh đà khởi động.



Hình 5. Cảm biến đo tốc độ bánh đà khởi động

4.4. Lựa chọn cảm biến đo cường độ dòng điện khởi động

Theo tính toán và đo thực tế trên xe xích quân sự hạng trung, giá trị cường độ dòng điện khi khởi động đến khoảng 800A, do đó nhóm tác giả lựa chọn đo cường độ dòng điện khởi động bằng shunt trở 1000A kết hợp cùng đồng hồ đo cường độ dòng điện [2]. Để đưa tín hiệu giá trị cường độ dòng điện vào mô đun đo lường của máy tính nhúng, nhóm tác giả sử dụng ampe kìm có khoảng đo dòng điện một chiều từ 0A đến 1400A. Tín hiệu ra của ampe kìm là điện áp quy đổi theo cường độ dòng điện.

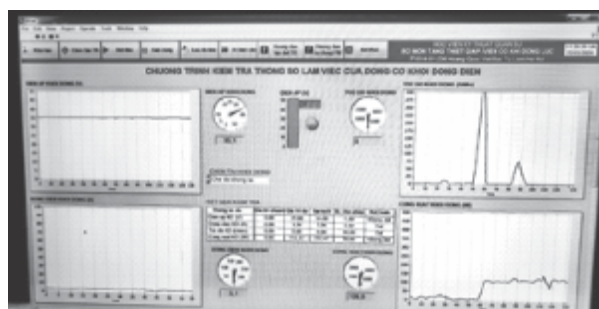
4.5. Lựa chọn cảm biến mô men cản và chế tạo đồ gá

Mô men cản khởi động được đo qua giá trị lực ép lên tang trống của bánh đà khởi động. Giá trị lực ép ghi nhận thông qua việc sử dụng loadcell đo lực. Cơ cấu tạo lực ép lên tang trống của bánh đà được bao gồm xylanh điện có điều chỉnh hành trình, guốc phanh và đồ gá của cơ

cấu tạo lực ép. Tín hiệu lực ép được đưa lên đồng hồ và quy đổi ra mô men cản khởi động thông qua bước calib tín hiệu. Đồng hồ đo mô men cản khởi động có cổng xuất tín hiệu ra để đưa vào mô đun đo lường trên máy tính nhúng. Đo giá trị điện áp bằng đồng hồ đo có sẵn trên thị trường, khoảng giá trị đo và độ chính xác phù hợp theo tiêu chuẩn của ngành. Sử dụng công tác chung (công tắc mát) trên xe xích quân sự làm công tắc của giá thử [3], [4].

4.6. Xây dựng chương trình đo thử nghiệm

Sử dụng, khai thác các mô đun đo lường, máy tính nhúng, phần mềm LabView... được trang bị tại Bộ môn Tăng Thiết giáp, Học viện Kỹ thuật quân sự để xây dựng chương trình đo các thông số khi thử nghiệm động cơ khởi động. Trên giao diện của chương trình có các thông số đo, bao gồm: điện áp, cường độ dòng điện, tốc độ vòng quay bánh đà, mô men cản khởi động, độ sụt điện áp mỗi lần khởi động, có 04 (bốn) đồ thị và có bảng so sánh giữa các giá trị đo được và các giá trị tiêu chuẩn theo tiêu chuẩn ngành. Chương trình đo có tính năng xử lý tín hiệu, hiển thị và lưu trữ các giá trị đo khi thử nghiệm động cơ khởi động. Kết quả đo có thể xuất ra thành các file dữ liệu để thuận lợi cho quá trình đọc, in kết quả đo trong các báo cáo thí nghiệm... Hình 6 trình bày giao diện đo các thông số khi thử nghiệm trên giá thử động cơ khởi động.



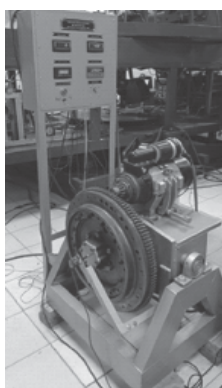
Hình 6. Giao diện đo các thông số khi thử nghiệm trên giá thử động cơ khởi động

5. XÂY DỰNG TRÌNH TỰ CÁC BƯỚC THỬ NGHIỆM ĐỘNG CƠ KHỞI ĐỘNG

Trình tự các bước thử nghiệm động cơ khởi động trên giá thử nghiệm được xây dựng theo mẫu tài liệu chuyên ngành, trong đó nêu về mục đích thử nghiệm, yêu cầu thử nghiệm, công tác an toàn, mô tả về trang thiết bị, các bước tiến hành, mẫu báo cáo kết quả thử nghiệm....

6. LẮP ĐẶT VÀ CHẠY THỬ

Các bộ phận của giá thử động cơ khởi động sau khi chế tạo xong lắp lên phần thân của giá thử, các trang thiết bị đo lường được kiểm chuẩn bởi cơ quan có thẩm quyền. Nội dung tổng lắp bao gồm: Lắp các đồng hồ đo lường và đi dây dẫn; lắp các cảm biến đo (tốc độ quay, cường độ dòng điện, mô men cản); lắp đặt giá kẹp động cơ khởi động và điều chỉnh độ đồng tâm, điều chỉnh khe hở tiêu chuẩn. Sử dụng bộ nguồn 28V để cấp nguồn cho động cơ khởi động làm việc, công suất của bộ nguồn được lựa chọn giá trị lớn hơn với công suất của 04 bình điện trên xe xích quân sự. Sau khi lắp đặt, kết nối các dây dẫn tín hiệu và kiểm tra tổng thể, tiến hành vận hành thử nghiệm giá thử động cơ khởi động. Hình 7 trình bày giá thử động cơ khởi động sau khi lắp đặt và kiểm tra.



Hình 7. Giá thử động cơ khởi động

7. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

Sử dụng đối tượng thử nghiệm cho giá thử là động cơ khởi động CT16M có tình trạng kỹ thuật tốt, đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn ngành. Các giá trị thử nghiệm nằm trong khoảng cho phép và ổn định ở nhiều lần đo. Các kết quả đều nằm khoảng giá trị cho phép, bao gồm cường độ dòng điện khởi động: 300A; tốc độ quay của bánh đà: 250 vòng/phút; điện áp: 28V. Giá thử hoạt động ổn định sau nhiều lần thử và tiếp tục được theo dõi trong thời gian tới.

8. KẾT LUẬN

Kết quả chạy thử và kiểm tra giá thử động cơ khởi động đảm bảo được các thông số đo phù hợp. Giá trị đo của các thông số nằm trong giá trị cho phép. Giá thử động cơ khởi động sẽ được đưa vào phục vụ quá trình đào tạo, huấn luyện và các nội dung khác theo nhu cầu.

Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả cảm ơn sự tạo điều kiện và giúp đỡ của Bộ môn Tăng Thiết giáp, Học viện Kỹ thuật quân sự và các cơ quan liên quan. ❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**

Ngày phản biện: **15/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Vũ Quang Hồi, “*Trang bị điện điện tử công nghiệp*”. NXB. Giáo dục, Hà Nội, 2016.
- [2]. Đào Hoa Việt, “*Thiết bị điện điện tử trên xe*”. Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 2005.
- [3]. “*Руководство по материалной части эксплуатации танка Т-54*”, Москва, 1962.
- [4]. “*Руководство по материалной части эксплуатации танка Т-55*”, Москва, 1969.

ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG MỐI HÀN KHI HÀN MA SÁT KHUẤY CÓ HỖ TRỢ ĐIỆN ÁP

WELD QUALITY ASSESSMENT WHEN WELDING FRICTION STIRRING WITH VOLTAGE

Lê Thái Sơn, Lê Phú Cường

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu thực nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của điện áp đến chất lượng mối hàn EAFSW trên máy phay CNC có so sánh với kết quả hàn FSW không hỗ trợ của điện áp của nhóm nghiên cứu khác. Các thông số chế độ hàn được khảo sát gồm: Tốc độ quay trục chính (S), vận tốc hàn (F), lượng dịch chuyển của đầu khuấy (t) và điện áp hỗ trợ (U) có ảnh hưởng đáng kể đến cơ tính mối hàn. Kết quả đánh giá chất lượng mối hàn EAFSW cho thấy độ bền kéo của mối hàn tăng lên từ 167 MPa đến 174 MPa so với hàn FSW.

Từ khóa: FSW – Hàn ma sát khuấy; EAFSW – Hàn ma sát khuấy có hỗ trợ điện áp.

ABSTRACT

The article presents the results of experimental research on the influence of voltage on the quality of EAFSW welds on CNC milling machines compared with the results of FSW welding without voltage support of another research group. The investigated welding mode parameters include: Main shaft rotation speed (S), welding speed (F), displacement of the stirring head (t) and supporting voltage (U) which have significant effects on the mechanical properties of the weld. The results of the evaluation of the quality of EAFSW welds show that the tensile strength of the weld increases from 167 MPa to 174 MPa compared to FSW welding.

Keywords: FSW – Friction stir welding; EAFSW – Voltage assisted friction stir welding.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hàn ma sát khuấy được phát minh và thực nghiệm vào năm 1991 tại Học viện hàn của Vương Quốc Anh (The Welding Institute - TWI) bởi John Wayne và các đồng sự. Từ khi ra đời cho đến nay, hàn ma sát khuấy (Friction Stir Welding - FSW) đã trở thành một lĩnh vực

đóng góp lớn cho các ngành công nghiệp [1], [2]. Ở ngoài nước, để nâng cao chất lượng mối hàn khi hàn FSW đã có nhiều công trình đi sâu nghiên cứu như: Hàn ma sát khuấy hỗ trợ siêu âm (UAFSW), Hàn ma sát khuấy hỗ trợ điện áp (EAFSW) được phân tích vùng khuấy (SZ), vùng ảnh hưởng nhiệt cơ học (TMAZ) và vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ).



Hàn ma sát khuấy – Friction Stir Welding (FSW) [2] có thể được cho là một lĩnh vực khá mới mẻ đang có những bước tiến lớn gần đây, là một hướng công nghệ thân thiện với môi trường do không tạo khí độc khi hàn, không phát tia hồ quang và năng lượng bức xạ. Ngoài ra, FSW khắc phục được nhiều khó khăn mà những giải pháp hàn truyền thống mắc phải, không cần dùng kim loại phụ để điền đầy mối hàn, mối hàn biến dạng ít và không bị nứt khi kết tinh [4], [5]. Tuy nhiên, vấn đề cần tập trung nghiên cứu để đưa công nghệ hàn FSW sang công nghệ hàn EAFSW nhằm nâng cao chất lượng mối hàn đang còn là hướng mở. Tác dụng của dòng điện một chiều tạo nên sự dịch chuyển điện tích trong quá trình hàn, đã tham gia làm nóng phôi tạo nên sự khác biệt giữa hàn FSW so với hàn EAFSW. Quá trình sử dụng một đầu khuấy ít bị ăn mòn để tạo ra sức nóng ma sát trong phôi [3]. Hàn EAFSW cũng được hình thành theo 3 giai đoạn: Giai đoạn đầu (làm nóng sơ bộ); Giai đoạn chính (khuấy vật liệu); Giai đoạn kết thúc (làm nguội và đông đặc): vật liệu hàn nguội dần và kết tinh thành mối hàn có độ bền cao [6]. Khi được hỗ trợ điện áp, cơ tính mối hàn EAFSW được tăng lên đáng kể so với hàn FSW.

Ở Việt Nam, công nghệ hàn FSW và EAFSW đang được nhiều nhà nghiên cứu đưa vào ứng dụng trên thực tế. Tuy nhiên, những công bố về vấn đề này còn ít, vì vậy nghiên cứu ảnh hưởng của một số chế độ hàn EAFSW đến chất lượng mối hàn trong công trình này là cần thiết.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết bị thí nghiệm

Sử dụng máy phay CNC, Vcenter-85 (Đài Loan), đầu khuấy được chế tạo bằng thép

hợp kim 40Cr (Liên bang Nga) được bọc cách điện. Phôi dùng thí nghiệm là hợp kim nhôm tấm A5052 có chiều dày 5 mm (xuất xứ từ Malaysia). Kiểm tra chất lượng mối hàn bằng máy siêu âm OLYPULSEPOCH 600 (Hoa Kỳ). Độ bền kéo mối hàn được xác định khi thực hiện thử phá hủy mẫu trên máy kéo - nén TYE – 2000 (Liên bang Nga). Sử dụng máy đo rung động để đánh giá và so sánh đối chứng chất lượng mối hàn khi hàn EAFSW so với hàn FSW.

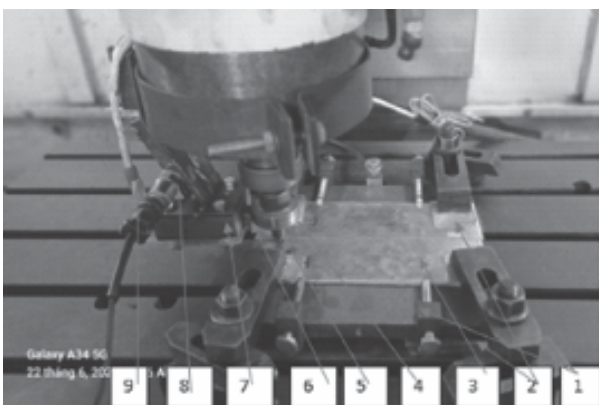
Khi nghiên cứu về hàn FSW, tác giả [1] đã chọn các số liệu trong bảng 1. Từ các nghiên cứu của [2], [3], [4] và [6] chọn chế độ hàn thử nghiệm như bảng 2.

Bảng 1. Số liệu thí nghiệm khi hàn FSW

TT	Tốc độ quay (S, vòng/phút)	Vận tốc hàn (F, mm/phút)	Lượng dịch chuyển (t, mm)	Điện áp hỗ trợ (U, V)
01	800	50	0.15	0
02	800	100	0.15	0
03	800	150	0.15	0
04	800	200	0.15	0
05	1000	50	0.15	0
06	1000	100	0.15	0
07	1000	150	0.15	0
08	1000	200	0.15	0
09	1200	50	0.15	0
10	1200	100	0.15	0
11	1200	150	0.15	0
12	1200	200	0.15	0

Bảng 2. Chế độ hàn EAFSW thử nghiệm và kết quả

TT	Tốc độ quay (S, vòng/phút)	Vận tốc hàn (F, mm/phút)	Lượng dịch chuyển (t, mm)	Điện áp hỗ trợ (U, V)
01	600	50	0.15	3
02	600	100	0.15	6
03	600	150	0.15	9
04	600	200	0.15	12
05	800	50	0.15	3
06	800	100	0.15	6
07	800	150	0.15	9
08	800	200	0.15	12
09	1000	50	0.15	3
10	1000	100	0.15	6
11	1000	150	0.15	9
12	1000	200	0.15	12



Hình 1. Sơ đồ hệ thống thực nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của điện áp đến chất lượng mối hàn EAFSW:

1. Thanh kẹp; 2. Tấm cách điện; 3. Phôi hàn; 4. Bạc tiếp điện; 5. Đầu khuấy; 6. Lõi than chì; 7. Bạc phíp; 8. Đầu đo rung; 9. Dây dẫn điện



Hình 2. Thiết bị cung cấp dòng điện một chiều:
1. Đồng hồ hiển thị; 2. Nút điều chỉnh.

2.2. Kết quả thí nghiệm

* Tiến hành thực nghiệm theo bảng 1 và bảng 2, thu nhận được các kết quả như sau:



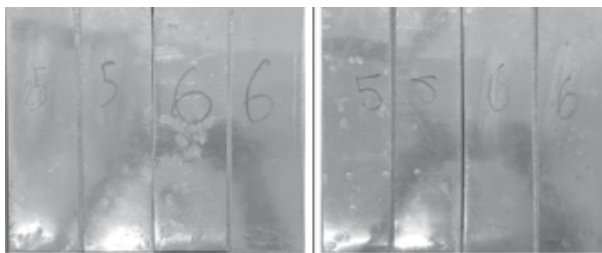
(a)



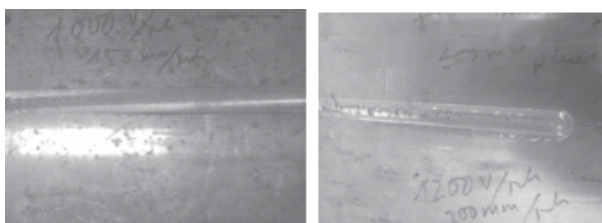
(b)

Hình 3. Kết quả siêu âm mẫu 06 khi hàn FSW so với hàn EAFSW: (a) Siêu âm khi hàn FSW (b) Siêu âm khi hàn EAFSW

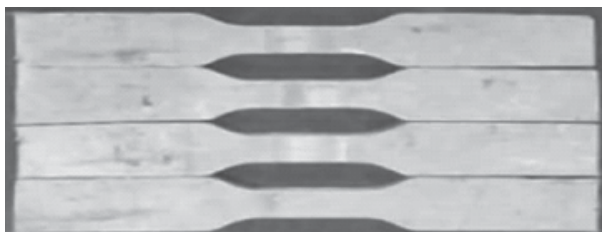




(a) (b)
Hình 4. Kết quả chụp ảnh mẫu 05 và mẫu 06: (a) Chụp mặt trước, (b) Chụp mặt sau khi hàn EAFSW

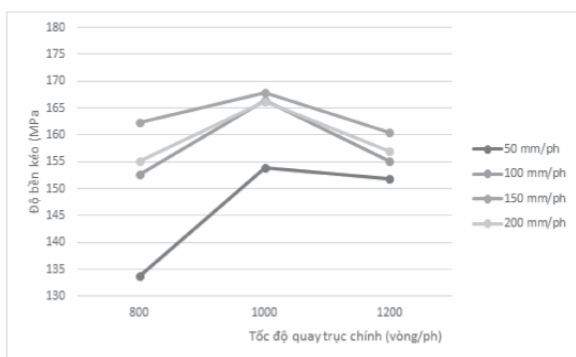


Hình 5. Kết quả chụp ảnh mặt trước mẫu 07 và mẫu 12 khi hàn FSW



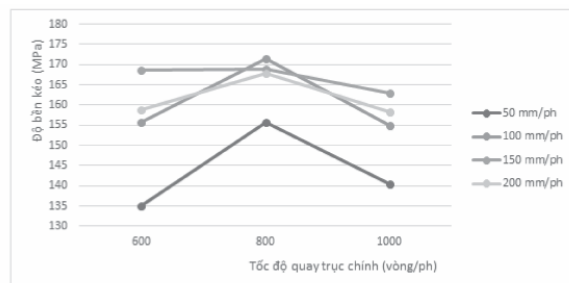
Hình 6. Ảnh phối được chuẩn bị để đưa vào kéo theo TCVN 197-1:2014

* Kết quả kiểm tra độ bền kéo khi S; F thay đổi của hàn FSW theo bảng 1:



Hình 7. Độ bền kéo khi S; F thay đổi của hàn FSW

* Kết quả kiểm tra độ bền kéo khi S; F; V thay đổi của hàn EAFSW theo bảng 2:



Hình 8. Độ bền kéo khi S; F thay đổi của hàn EAFSW

2.3. Thảo luận kết quả

Nhìn vào kết quả của việc đo siêu âm và việc kéo đứt mẫu thử để kiểm tra chất lượng mối hàn trên hình 7 và 8, ta thấy chất lượng mối hàn EAFSW đã được tăng lên so với kết quả khi hàn FSW. Nếu được đầu tư nghiên cứu sẽ tìm được bộ thông số tối ưu cho quá trình hàn, nhôm và các kim loại màu:

- Khi hàn ở chế độ S = 600 v/phút; t = 0,15mm; F = 50mm/phút; 100mm/phút; 150mm/phút; 200mm/phút, thay đổi U từ 3V-12V. Từ kết quả trên cho thấy mối hàn không ngấu, kim loại chưa điền đầy mối hàn, bên trong còn có rỗ xốp, chất lượng mối hàn chỉ đạt 50% - 70% so với tính chất của kim loại ban đầu. Ở chế độ hàn này, do khuấy tốc độ không cao, chế độ dịch chuyển chậm nên kim loại bị khuấy chảy loãng không đều do chưa đủ nhiệt để giúp phần kim loại bị khuấy hòa trộn vào nhau. Ở chế độ hàn này xảy ra chậm nên một phần nhiệt sinh ra truyền vào mặt đe (phần đồ gá), như vậy đối với nhôm A5052 khi hàn EAFSW không nên sử dụng chế độ này.

- Khi hàn ở chế độ S = 800v/phút; t = 0,15mm; F = 50mm/phút; 100mm/phút; 150mm/phút; 200mm/phút, thay đổi U từ 3V-12V. Kết

quả trên cho thấy chất lượng mối hàn tăng lên, tuy nhiên kim loại vẫn chưa điền đầy mối hàn, bên trong còn có rỗ xốp, chất lượng mối hàn đã đạt 80% - 90% so với tính chất của kim loại ban đầu. Ở chế độ hàn này, do khuấy tốc độ cao, chế độ dịch chuyển tăng lên nên khi kim loại bị khuấy chảy loãng đều hơn, do nhiệt truyền vào vùng hàn nhiều hơn, phần kim loại bị khuấy đã được hòa trộn vào nhau. Ở chế độ hàn này xảy ra trung bình nên một phần nhiệt sinh ra truyền vào mặt đe (phần đồ gá), như vậy đối với nhôm A5052 khi hàn EAFSW nên sử dụng chế độ này để hàn, đặc biệt khi $S = 800$ v/phút; $F = 100$ mm/phút; $U = 6$ V đã thu được chất lượng mối hàn tốt nhất.

Từ kết quả trên cho thấy thông số công nghệ hàn ma sát sử dụng hợp lý sẽ giảm thiểu khoảng cách về nhiệt giữa vùng tâm mối hàn và vùng ảnh hưởng nhiệt, đồng thời khống chế nhiệt độ của vùng khuấy là những vấn đề đáng được quan tâm. Nhiệt độ tại tâm mối hàn càng cao gần đến nhiệt độ nóng chảy của vật liệu nền càng khiến mối hàn trở nên quá nhiệt và giòn là điều chúng ta không mong muốn [2, 6]. Tuy nhiên cũng không nên quá thấp vì lúc đó vật liệu sẽ không đủ dẻo để khuấy lẫn vào nhau nên rất dễ bị khuyết tật đường hàn.

- Khi hàn ở chế độ $S = 1000$ v/phút; $t = 0,15$ mm; $F = 50$ mm/phút; 100 mm/phút; 150 mm/phút; 200 mm/phút, thay đổi U từ 3 V- 12 V. Từ đó cho thấy chất lượng mối hàn tăng lên nhưng kim loại vẫn chưa điền đầy mối hàn, bên trong còn có rỗ xốp, chất lượng mối hàn đã đạt 70% - 80% so với tính chất của kim loại ban đầu. Ở chế độ hàn này, do khuấy tốc độ cao, chế độ dịch chuyển tăng lên nên khi kim loại bị khuấy chảy loãng đều hơn, do đó nhiệt truyền vào vùng hàn nhiều hơn, phần kim loại bị khuấy đã được hòa trộn vào nhau. Ở chế độ hàn này xảy ra chậm nên một phần nhiệt sinh ra cũng truyền vào mặt

đe (phần đồ gá). Tuy nhiên, do F tăng nên khả năng truyền nhiệt giảm, như vậy đối với nhôm A5052 khi hàn EAFSW nếu máy đủ vận tốc quay lớn thì ta có thể sử dụng chế độ này.

3. KẾT LUẬN

Bằng thực nghiệm trên máy phay CNC Vcenter-85 đã đưa ra bộ thông số hàn EAFSW hợp lý vật liệu nhôm A5052 chiều dày 5 mm gồm: $S = 800$ v/phút; $F = 100$ mm/phút; $t = 0,15$ mm; $U = 6$ V, đảm bảo chất lượng hàn tốt nhất. ❖

Ngày nhận bài: 02/6/2025

Ngày phản biện: 12/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Công Trọng (2021), “*Nghiên cứu ảnh hưởng của rung động đến chất lượng của mối hàn khi hàn ma sát khuấy*”. Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh.
- [2]. Moosa Sajed, John William Grimaldo Guerrero, Hamed Aghajani Derazkola (2023), “*A Literature Survey on Electrical-Current-Assisted Friction Stir Welding*”. <https://doi.org/10.3390/app13031563>.
- [3]. Kaushik Sengupta, Dilip K. Singh, Arpan K. Mondal, D. Bose, Debtanu Patra, Arindam Dhar (2021), “*Characterization of tool wear in similar and dissimilar joints of MS and SS using EAFSW*”. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.012>, Volume 44, Part 6, 2021, Pages 3967-3975.
- [4]. Kaushik Sengupta, Dilip Kr.Singh, Arpan K Mondal, D. Bose, Biswajit Ghosh (2021), “*Analysis of mechanical property of electrically assisted friction stir welding to enhance the efficiency of joints*”. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.321>, Volume 38, Part 5, 2021, Pages 2263-2270.
- [5]. Ivy Chowdhury, Kaushik Sengupta, Kaustav Kumar Maji, Swapna Roy, Sujit Ghosal (2022), “*Investigation of mechanical properties of dissimilar joint of Al6063 aluminium alloy and C26000 copper alloy by ultrasonic assisted friction stir welding*”. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.103>, Volume 50, Part 5, 2022, Pages 1527-1534.
- [6]. Ivy DasChowdhury, Kaushik Sengupta, DilipKr. Singh, Swapna Roy, Sujit Ghosal, Arpan Kr Mondal, Ujan Sengupta (2021), “*Study of mechanical properties of mild steel joint made by electrically assisted friction stir welding using DC and AC*”. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.011>, Volume 44, Part 6, 2021, Pages 3959-3966.

CHIẾN LƯỢC DẪN ĐƯỜNG RÔ BỐT DẠNG BÁNH DỰA TRÊN GIẢI THUẬT BIT* VÀ PHƯƠNG PHÁP HỌC TĂNG CƯỜNG

WHEELED MOBILE ROBOT NAVIGATION BASED ON BIT* ALGORITHM AND REINFORCEMENT LEARNING METHOD

Vũ Ngọc Phúc¹, Bùi Như Nghĩa², Đặng Thái Việt^{2,*}

¹Trường Cao đẳng Nghề Bách Khoa Hà Nội

²Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email: viet.dangthai@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Rô bốt di động ngày càng được sử dụng rộng rãi trong rất nhiều lĩnh vực trong đời sống và sản xuất công nghiệp. Dựa vào hệ nhận thức của rô bốt trong môi trường di chuyển, các vấn đề về dẫn đường tối ưu trong môi trường không biết trước là một trong các trở ngại trong bài toán điều khiển và dẫn đường rô bốt tự hành. Để giải quyết vấn đề nêu trên, nhóm tác giả đề xuất chiến lược dẫn đường kiểu lai giữa thuật toán BIT* cải tiến và mô hình học tăng cường (RL). Thuật toán BIT*-RL sử dụng tìm đường toàn cục trong môi trường không biết trước sử dụng thuật toán BIT*. Sau đó, mô hình học tăng cường sử dụng hai cấu trúc MobileNetV2 cho tối ưu thông số huấn luyện và mô hình UNet cho tối ưu hành động thực thi. Cuối cùng mô hình rô bốt di động ba bánh được kiểm chứng thông qua thực nghiệm và mô phỏng tính toán đã chứng minh các ưu việt trong tối ưu quá trình tìm kiếm đường đi, đáp ứng đồng thời đa nhiệm vụ.

Từ khóa: Hệ nhận thức rô bốt; Mô hình học tăng cường; Rô bốt di động; Thuật toán dẫn đường BIT*.

ABSTRACT

Mobile robots are increasingly used in many areas of life and industrial production. Based on the robot's perception system in the moving environment, the problem of optimal navigation in an unknown environment is one of the obstacles in the problem of controlling and guiding autonomous robots. To solve the above problem, the authors propose a hybrid navigation strategy between the improved BIT* algorithm and the reinforcement learning (RL) model. The BIT*-RL algorithm uses global path finding in an unknown environment using the BIT* algorithm. Then, the reinforcement learning model uses two MobileNetV2 structures for optimizing training parameters and the UNet model for optimizing execution actions. Finally, the three-wheeled mobile robot model is verified through experiments and computational simulations, demonstrating its superiority in optimizing the path finding process, meeting multiple tasks simultaneously.

Keywords: Mobile robot perception systems; Reinforcement learning model; Mobile robots; BIT* path planning.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, rô bốt di động đã trở nên nổi bật đáng kể trong lĩnh vực tự động hóa và rô bốt, thực hiện đồng thời nhiều nhiệm vụ điều hướng môi trường sản xuất, quân sự và đời sống. Lập kế hoạch hành động và đường đi là các thành phần cơ bản trong điều hướng tự động rô bốt di động có bánh xe (WMR) [1]. Dựa vào hệ nhận thức của rô bốt về môi trường hoạt động, rô bốt phải xây dựng một quỹ đạo khả thi từ vị trí ban đầu đến đích mong muốn. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra hệ cảm biến, Lidar và máy ảnh số thu thập dữ liệu từ môi trường nhằm mục đích xây dựng hệ tri thức của WMRs. Các phương pháp điều khiển và dẫn đường truyền thống thường chỉ hiệu quả khi biết vị trí của rô bốt, vật cản và môi trường đã biết trước. Sau khi xây dựng bản đồ số từ môi trường đã biết, WMR phải xây dựng chiến lược dẫn đường khả thi từ vị trí ban đầu đến đích. Hành trình này phải tuân thủ các tiêu chí cụ thể, bao gồm giảm chi phí vận hành, xác định tuyến đường thuận tiện nhất hoặc giảm thiểu thời gian di chuyển [2].

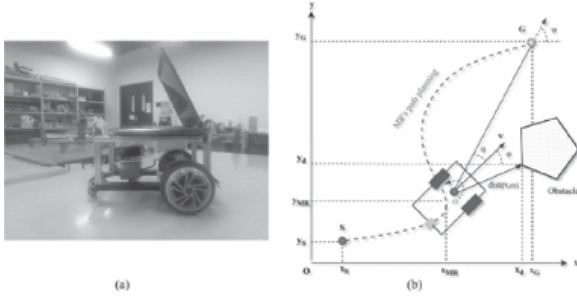
Các kế hoạch dẫn đường được phân loại thành hai loại chính: Lập kế hoạch đường đi toàn cục và cục bộ. Lập kế hoạch đường đi toàn cục (GPP) xác định một chuỗi các điểm dừng quan trọng kết nối điểm bắt đầu với điểm cuối trong tổng thể môi trường rô bốt di chuyển [3]. GPP sử dụng ba kỹ thuật cơ bản: Tìm kiếm đồ thị, tìm kiếm lấy mẫu và tìm kiếm động. Các thuật toán tìm kiếm đồ thị, chẳng hạn như Dijkstra [4] và A*[5], vượt trội trong không gian chiều thấp, đảm bảo khám phá toàn diện các tuyến đường tiềm năng. Ngược lại, các thuật toán tìm kiếm lấy mẫu phù hợp với

không gian chiều cao, cung cấp sự đảm bảo xác suất về tìm đường. Mặt khác, tìm kiếm động cải thiện khả năng kết nối của các nút đường dẫn, mặc dù phải đánh đổi bằng một số tính toán chính. Tuy nhiên, lập kế hoạch đường dẫn cục bộ (LPP) đòi hỏi khả năng tính toán nhanh, chất lượng đảm bảo, tạo ra các quỹ đạo chính xác từ nút bắt đầu đến nút mục tiêu trong một khu vực cục bộ [6]. LPP bao gồm các phương pháp truyền thống như dải đàn hồi thời gian (TEB), phương pháp cửa sổ động (DWA), và trường thế năng nhân tạo (APF) hay mạng trí tuệ nhân tạo [7].

Dựa vào các phân tích đã nêu, các chiến lược dẫn đường khác nhau có những ưu điểm và nhược điểm riêng biệt. Để tạo điều kiện cho chuyển động liền mạch và tăng cường tính ổn định của WMR bám quỹ đạo, nhóm tác giả đề xuất chiến lược dẫn đường kiểu lai kết hợp thuật toán BIT* cải tiến với mô hình học tăng cường (RL) [8]. Đầu tiên, thuật toán tìm đường BIT* được cải tiến nhằm giảm thiểu các bước tính dư thừa trong quá trình tìm đường khả thi từ điểm xuất phát đến điểm đích. Để tăng hiệu quả của quá trình lấy mẫu trong giải thuật tìm đường BIT* trong các môi trường chưa biết hoặc phức tạp, các tác giả đã kết hợp BIT* vào trong mô hình học tăng cường. Thuật toán kiểu lai BIT*-RL cung cấp những ưu điểm, bao gồm việc giảm thiểu việc lấy mẫu không hiệu quả, trích xuất các đặc điểm bản đồ kết hợp dữ liệu đã được đào tạo vào quy trình tìm đường và tăng tốc thời gian xử lý do nhu cầu xem xét mẫu giảm. Cuối cùng, các kết quả mô phỏng và thực nghiệm minh chứng sự thành công và hiệu quả cao khi áp dụng giải thuật tìm đường BIT*-RL cho điều hướng WMRs trong các môi trường chưa biết hoặc phức tạp. 

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán học WMR



Hình 1. Rô bốt di động ba bánh di chuyển theo chiến lược dẫn đường với (a): Mô hình thực tế và (b): Biểu diễn mô hình toán học.

Mô hình rô bốt di động ba bánh sử dụng trong thực nghiệm như trong Hình 1. Dựa trên phương trình Euler-Lagrange (1) mô tả phương trình Routh động lực học phi toàn thể:

$$A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = E(q)\tau + F^T(q)\lambda + \Delta\zeta \quad (1)$$

Trong đó: $A(q) \in R^{n \times n}$ là ma trận đối xứng, $\tau \in R^r$ là vectơ đầu vào, $E(q) \in R^{n \times r}$ là ma trận chuyển tiếp của vectơ đầu vào, $F^T(q) \in R^{n \times n}$ là ma trận về ràng buộc. $C(q, \dot{q}) \in R^n$ biểu diễn ma trận Coriolis. $\lambda \in R^m$ là hệ số nhân Lagrange và $\Delta\zeta \in R^n$ là độ bất định trong mô hình danh nghĩa. $E(q)$ được định nghĩa trong phương trình (2) sau:

$$E(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

Dựa trên kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả đã công bố tại [1], mô hình toán học của WMR được xây dựng như phương trình (3):

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} = \frac{ML_1 \sin \alpha [K_2 g - ML_1 \dot{\alpha}^2 \cos \alpha]}{K_2 K_3 - M^2 L_1^2 \cos^2 \alpha} + g_{11}(\tau_r + \tau_l) + \Delta_4 \zeta \\ \dot{v} = \frac{ML_1 \sin \alpha [K_2 \dot{\alpha}^2 - ML_1 g \cos \alpha]}{K_2 K_3 - M^2 L_1^2 \cos^2 \alpha} + g_{21}(\tau_r + \tau_l) + \Delta_5 \zeta \end{cases} \quad (3)$$

2.2. Chiến lược dẫn đường BIT*-RL

2.2.1. Thuật toán dẫn đường BIT*

Thuật toán BIT* giải quyết hiệu quả các vấn đề lập kế hoạch đường đi tối ưu tiệm cận với các điểm lấy mẫu tối thiểu trong môi trường có các chướng ngại vật đơn giản, thưa thớt. Tuy nhiên, hiệu suất của thuật toán này giảm đáng kể trong các môi trường phức tạp nơi cần nhiều điểm lấy mẫu hơn đáng kể. Khi áp dụng vào các ứng dụng thực tế, thuật toán BIT* truyền thống thể hiện hiệu suất không tối ưu do tạo ra các nút vi phạm các ràng buộc về mặt động học của rô bốt di động, dẫn đến hiệu quả tính toán kém. Hơn nữa, thuật toán này đòi hỏi phải có hậu xử lý bổ sung để lọc các nút khả thi về mặt động học trước khi xây dựng đường dẫn giải pháp cuối cùng. Nhóm tác giả đã cải tiến thuật toán dẫn đường BIT* dựa trên mô hình động lực học của WMR như trong thuật toán 1 trong Hình 2.

Algorithm 1: BIT* ($x_{start} \in X_{free}, x_{goal} \in X_{goal}$)

```

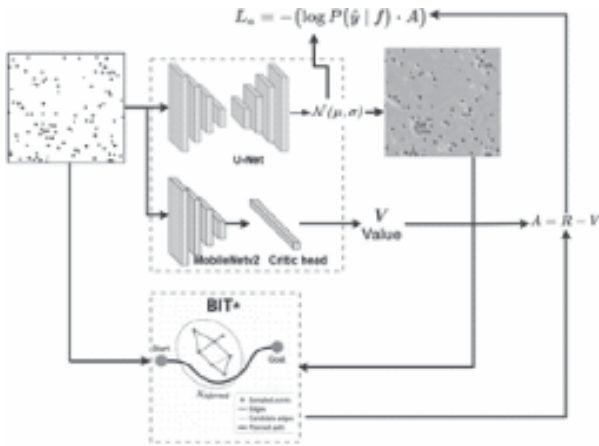
1:  $V \leftarrow \{x_{start}\}$ ;  $E \leftarrow \emptyset$ ;  $X_{samples} \leftarrow \{x_{goal}\}$ 
2:  $Q_E \leftarrow \emptyset$ ;  $Q_V \leftarrow \emptyset$ ;  $r \leftarrow \infty$ 
3: repeat
4:   if  $Q_E = \emptyset$  and  $Q_V = \emptyset$  then
5:     EscapeStrategy()
6:     Prune( $gT(x_{goal})$ );
7:      $X_{samples} \leftarrow \text{Sample}(m, gT(x_{goal}))$ ;
8:      $V_{old} \leftarrow V$ ;
9:      $V \leftarrow V \cup X_{samples}$ ;
10:     $Q_V \leftarrow V$ ;
11:     $r \leftarrow \text{radius}(|V|) + |X_{samples}|$ ;
12:   end if
13:   while Best  $Q_V \leq$  Best  $Q_E$  do
14:     ExpandVertex(BestInQueue( $Q_V$ ));
15:   end while
16:    $(v_m, x_m) \leftarrow \text{BestInQueue}(Q_E)$ ;
17:    $Q_E \leftarrow Q_E \setminus \{(v_m, x_m)\}$ ;
18:   if  $gT(v_m) + \hat{c}(v_m, x_m) + h(x_m) \leq gT(x_{goal})$  then
19:     if  $gT(v_m) + c(v_m, x_m) + h(x_m) \leq gT(x_{goal})$  then
20:       if  $gT(v_m) + c(v_m, x_m) \leq gT(V)$  then
21:          $E \leftarrow \{(v_m, x_m) \in E\}$ ;
22:       else
23:          $X_{samples} \leftarrow \{x_m\}$ ;
24:          $V \leftarrow \{x_m\}$ ;  $Q_V \leftarrow \{x_m\}$ ;
25:       end if
26:     end if
27:      $E \leftarrow \{(v, x_m)\}$ ;
28:      $Q_E \leftarrow \{(v, x_m) \in Q_E \mid gT(v) + \hat{c}(v, x_m) \leq gT(x_m)\}$ ;
29:   else
30:      $Q_E \leftarrow \emptyset$ ;  $Q_V \leftarrow \emptyset$ ;
31:   end if
32: until STOP
33: return T;

```

Hình 2. Thuật toán tìm đường BIT* cải tiến

2.2.2. Mô hình học tăng cường (RL)

Thách thức chính đã nêu ở trên là việc ước tính hàm tìm kiếm BIT* với số lần lặp giới hạn, sẽ khó khăn khi xác định đường đi khả thi trong môi trường không biết. Mặc dù hàm BIT* có thể xác định đường dẫn chuyển động tối ưu, nhưng quá trình lấy mẫu của nó lại không hiệu quả vì nó không tận dụng bất kỳ thông tin nào liên quan đến môi trường và không rút ra được hiểu biết từ các vấn đề đã giải quyết trước đó. Để giải quyết những hạn chế này, các tác giả đã kết hợp mô hình học tăng cường vào thuật toán BIT*. Sự tích hợp này bao gồm một Actor xác định các hành động phù hợp cần thực hiện, trong khi Critic đánh giá hiệu quả của các hành động này và cung cấp phản hồi để điều chỉnh cần thiết. Kiến trúc tổng thể của khuôn khổ nâng cao này được mô tả trong Hình 3.



Hình 3. Cấu trúc thuật toán kiểu lai BIT*-RL

Phương pháp tính toán được xây dựng dựa trên phân phối chuẩn, được ký hiệu là $N(\mu, \sigma^2)$, trong đó:

$$\mu, \sigma^2 = \text{Actor}(\text{map}) \in \mathbb{R}^{H \times W} \quad (4)$$

Trong phương trình (4), các tham số của phân phối chuẩn được xử lý thông qua hàm Sigmoid, tạo ra một phạm vi giá trị từ 0 đến 1,

do đó tạo ra một bản đồ xác suất. Sau đó, hàm phân thưởng được xác định bằng công thức sau:

$$\text{Reward} = 1000 - \text{Cost} \quad (5)$$

Giá trị phân thưởng bằng 0 biểu thị sự vắng mặt của một đường dẫn thỏa đáng trong môi trường. Mô hình bao gồm hai thành phần chính: Actor và Critic. Actor được thiết kế bằng kiến trúc U-Net, chịu trách nhiệm tạo ra các bản đồ xác suất hoặc nói cách khác là tạo ra các hành động dựa trên đầu vào đã cho. Ngược lại, Critic sử dụng kiến trúc MobileNetV2 để đánh giá chính sách hiện tại hoặc các mẫu trọng số do Actor (π) tạo ra liên quan đến việc đạt được tham số phân thưởng. Cấu trúc kép này nâng cao khả năng và hiệu quả của mô hình trong việc tìm đường trong môi trường. Quá trình đánh giá được tiến hành thông qua hàm giá trị, trong phương trình (6):

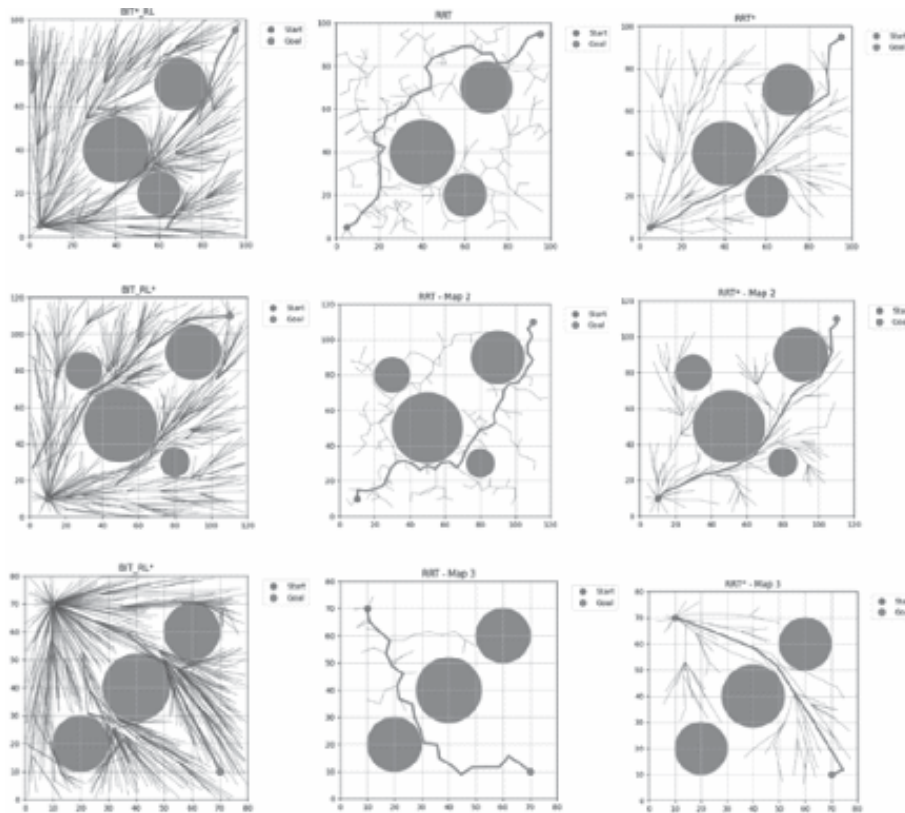
$$V(s) = E_{\pi} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \right] \quad (6)$$

Trong đó: $V(s)$ là hàm giá trị tại trạng thái tương ứng s ; E_{π} là kỳ vọng trung bình theo chính sách π được ánh xạ từ trạng thái; $\gamma \in [0,1]$ là hệ số chiết khấu; Phần thưởng tại trạng thái t được ký hiệu là r_t . Hàm $V(t)$ được tính toán để so sánh các phần thưởng thực tế, chọn các lợi thế (A) và tham gia tính toán tổn thất của Critic:

$$A = \text{Reward} - V(t) \quad (7)$$



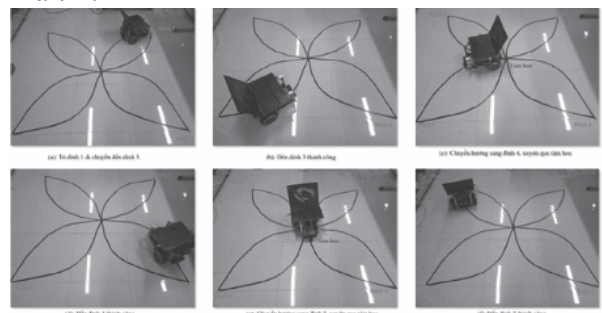
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



Hình 4. So sánh thuật toán tìm đường BIT*-RL với các phương pháp khác.

Trong kịch bản mô phỏng môi trường rô bốt di chuyển chưa biết trước, các tác giả đánh giá và đối chiếu các quỹ đạo do mô hình đề xuất tạo ra với các quỹ đạo do thuật toán BIT* tạo ra. Dựa trên xác suất của các vùng trong bản đồ, thuật toán BIT*-RL được đề xuất tạo ra các quỹ đạo ngắn hơn đáng kể so với thuật toán RRT*. Trong Hình 4, các đường tạo ra dựa trên mô hình BIT*-RL có giá trị cost trung bình là 92.12. Trong khi với các thử nghiệm với RRT* có cost trung bình ở mức 103.6 và thuật toán RRT thông thường có cost 112.49. Rõ ràng phương pháp được đề xuất cho ra đường đi gần với đường đi lý tưởng nhất so với các cách tiếp cận chưa được cải tiến. Trong các trường hợp

bản đồ với vật cản dày đặc, RRT* đôi khi không thể tìm ra đường đi khả thi đến đích. Nhưng mô hình tìm kiếm được đề xuất BIT*-RL đều thành công khi nhanh chóng tìm ra đường dẫn rô bốt khả thi.



Hình 5. Rô bốt di động ba bánh tám quỹ đạo hoa bốn cánh dựa trên thuật toán dẫn đường BIT*-RL.

Để củng cố khả năng ứng dụng thực

tiền, thuật toán BIT*-RL được cài đặt trên mô hình rô bốt ba bánh thực hiện kịch bản chạy bám quỹ đạo hình cánh hoa bốn cánh như Hình 5. Với việc sử dụng mô hình học tăng cường trong việc hỗ trợ xác định hướng đi tối ưu, đã giúp loại bỏ các nhánh dẫn đường dư thừa của BIT*, đặc biệt tối ưu tài nguyên thông qua số điểm nút dẫn ít nhất có thể. Hệ thống điều khiển rô bốt đảm bảo tốc độ xử lý, sự ổn định trong quá trình bám chiến lược dẫn đường, sai số tại các đỉnh cánh hoa gần như rất nhỏ. Tổng kết lại, thuật toán BIT*-RL đảm bảo thực hiện thành công quá trình tìm đường đi đáp ứng nhiều nhiệm vụ đặt ra: Tìm đường khả thi, đường đi ngắn nhất, loại bỏ các đường dư thừa, tối ưu số nút tìm kiếm và làm trơn quỹ đạo.

4. KẾT LUẬN

Bài báo nghiên cứu trình bày một phương pháp lập kế hoạch đường đi hiệu quả và tối ưu cho WMR, kết hợp các chiến lược tránh va chạm và các kỹ thuật làm mịn để xác định tuyến đường dẫn đường hiệu quả nhất. Chiến lược dẫn đường kiểu lai kết hợp thuật toán BIT* cải tiến và tối ưu mẫu tìm kiếm sử dụng mô hình học tăng cường. Thuật toán lập kế hoạch đường đi BIT*-RL được đề xuất đã được xác nhận thành công về tính khả thi và thực hiện hiệu quả nhiều mục tiêu được thiết lập trong các thí nghiệm mô phỏng và xác nhận. ❖

Ngày nhận bài: **23/6/2025**

Ngày phản biện: **09/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. V. T. Nguyen, D. N. Duong, and T. V. Dang, “Optimal Two-Wheeled Self-Balancing Mobile Robot Strategy of Navigation using Adaptive Fuzzy controller-based KD-SegNet”. Intelligent Service Robotics, 2025, doi:

10.1007/s11370-025-00606-0.
[2]. T. V. Dang, and N. T. Bui, “Obstacle Avoidance Strategy for Mobile Robot based on Monocular Camera”. Electronics, vol. 12, no. 8, pp. 1932, 2023, doi: 10.3390/electronics12081932.
[3]. T. V. Dang, “Optimization Hybrid Path Planning based on A-star Algorithm combining with DWA”. MM Science Journal, vol. 10, pp. 7551-7555, 2024, doi: 10.17973/MMSJ.2024_10_2024077.
[4]. L.S. Liu et al., “Path planning for smart car based on Dijkstra algorithm and dynamic window approach”. Wirel. Commun. Mob. Comput., vol. 4, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1088/10.1155/2021/8881684.
[5]. T. V. Dang, and D. S. Nguyen, “Optimal Navigation Based on Improved A* Algorithm for Mobile Robot”. Intelligent Systems and Networks, LNNS 752, pp. 574-580, 2023, doi: 10.1007/978-981-99-4725-6_68.
[6]. Y. Sun et al., “Local Path Planning for Mobile Robots Based on Fuzzy Dynamic Window Algorithm”. Sensor, vol. 23, no. 8260., 2023, doi.: 10.3390/s23198260
[7]. T.V. Dang, D. S. Nguyen, N. T. Bui, “Hybrid Path Planning for Mobile Robot based on Improved A* Fusion Dynamic Window Approach”. Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems and Networks, LNNS 1077, pp. 82-88, 2024, doi: 10.1007/978-981-97-5504-2_10.
[8]. A. D. Nguyen, T. D. Vu, Q. A. Vu, T. V. Dang, “Research on Modeling and Object Tracking for Robot Arm based on Deep Reinforcement Learning” MM Science Journal, vol. 6, pp.8459-8463, 2025, doi: 10.17973/MMSJ.2025_06_2025059.

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG PHÂN BỐ NHIỆT TRONG CÔNG NGHỆ SẢN XUẤT BỒI ĐẮP

SIMULATION RESEARCH ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ADDITIVE MANUFACTURING

ThS. Nguyễn Thái Sơn¹, PGS,TS. Nguyễn Chí Sáng², PGS,TS. Trần Ngọc Hiền^{3,*}

¹Trung tâm Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải,
Trường Đại học Giao thông vận tải, NCS. Viện Nghiên cứu Cơ khí

²Viện Nghiên cứu Cơ khí

³Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: tranhien.tkm@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Xác định chính xác nhiệt độ trong quá trình in rất quan trọng đối với sản xuất bồi đắp. Nhiệt độ quá nhỏ hay quá lớn đều ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Để đảm bảo chất lượng sản phẩm in, nhiệt độ trong quá trình in phải lớn hơn nhiệt độ chảy của vật liệu in. Nghiên cứu này xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới phân bố nhiệt độ khi in vật liệu bột Ti6Al4V theo phương pháp in nóng chảy laser chọn lọc (SLM). Các thông số công nghệ in SLM bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in. Kết quả nghiên cứu cho phép xác định bộ thông số công nghệ hợp lý khi tiến hành in trên máy in 3D.

Từ khoá: *Phân bố nhiệt khi in; Thông số công nghệ in; Sản xuất bồi đắp; Nóng chảy laser chọn lọc; Vật liệu bột Ti6Al4V.*

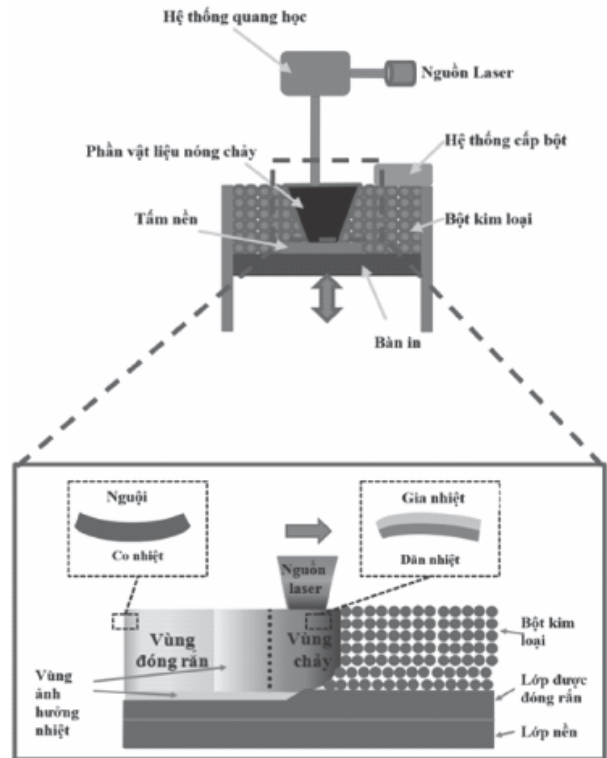
ABSTRACT

Determining the exact temperature during the printing process is very important for additive manufacturing. Too low or too high of temperature affects the quality of the printed product. To ensure the quality of the printed product, the temperature during the printing process must be higher than the melting temperature of the printed material. This study determines the influence of printing parameters on the temperature distribution when printing Ti6Al4V powder material using the selective laser melting (SLM) printing method. The SLM printing parameters include laser power, printing speed, and printing layer thickness. The research results allow determining the reasonable values of printing parameters when printing on a real 3D printer.

Keywords: *Temperature distribution; Printing parameters; Additive manufacturing; Selective laser melting; Ti6Al4V powder material.*

1. GIỚI THIỆU

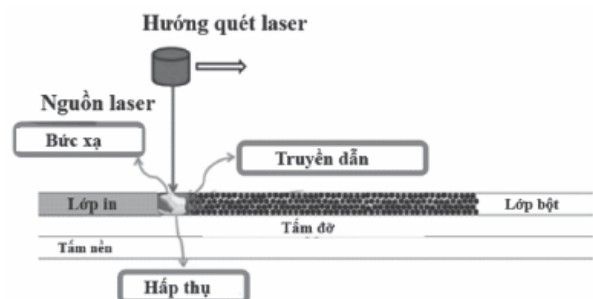
Công nghệ sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing, viết tắt AM) đã và đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực từ giáo dục, y tế đến các ứng dụng công nghiệp. Với sự phát triển của khoa học công nghệ và vật liệu mới, ngày nay công nghệ AM không những được sử dụng để tạo ra các sản phẩm mẫu (thường là vật liệu nhựa) trong giai đoạn thiết kế mà còn được sử dụng để tạo các chi tiết, sản phẩm cuối cùng với vật liệu kim loại [1]. Trong công nghệ AM, có nhiều phương pháp in đã và đang được áp dụng. Phương pháp in nóng chảy laser chọn lọc (SLM) là một trong những phương pháp in được dùng để tạo sản phẩm từ bột kim loại [2]. Hình 1 thể hiện cơ chế in SLM. Ban đầu lớp bột kim loại được rải trên tấm nền, nguồn laser thông qua hệ thống quang học làm nóng chảy lớp bột và hình thành lớp in đầu tiên. Để in lớp thứ hai, bàn in được dịch chuyển xuống theo phương thẳng đứng một lượng bằng chiều dày lớp in. Hệ thống cấp bột rải lớp bột mới lên lớp vừa in. Sau đó, lớp bột này được làm nóng chảy bởi năng lượng laser để hình thành lớp thứ hai. Quá trình này được lặp lại đến hết chiều cao của chi tiết cần in [3]. Để đảm bảo được các yêu cầu làm việc, chi tiết in phải thỏa mãn các yêu cầu về độ chính xác kích thước, độ chính xác hình dạng, chất lượng bề mặt và các thuộc tính cơ khí. Tuy vậy, cơ chế in phức tạp với sự thay đổi trạng thái của vật liệu từ rắn (trạng thái ban đầu) đến lỏng (giai đoạn nóng chảy) và cuối cùng là trạng thái rắn (sau khi in xong), thời gian chuyển trạng thái ngắn dẫn đến ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Chính vì vậy, nghiên cứu nhằm nâng cao năng suất, chất lượng sản phẩm luôn được các nhà nghiên cứu, đơn vị ứng dụng quan tâm. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu về phân bố nhiệt khi in theo phương pháp SLM trong mối liên hệ với các thông số công nghệ của quá trình in.



Hình 1. Cơ chế in SLM [3]

2. MÔ HÌNH TRUYỀN NHIỆT CỦA QUÁ TRÌNH IN SLM

Khi nguồn laser quét trên bề mặt lớp bột, năng lượng được truyền từ lớp trên cùng xuống các lớp dưới thông qua nhiều thay đổi vật lý khác nhau, chẳng hạn như: truyền nhiệt, bức xạ, đối lưu, dẫn nhiệt, dòng chất lỏng chảy trong vùng nóng chảy, nóng chảy, bay hơi và phản ứng hóa học [3].



Hình 2. Mô hình truyền nhiệt khi in SLM [4]



Mô hình toán để xác định nhiệt độ trong quá trình in trong mối liên hệ với thuộc tính nhiệt của vật liệu, thông số công nghệ in được thể hiện như sau [5]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q_{\text{nguồn nhiệt}} \quad (1)$$

Với T là nhiệt độ (K); ρ là khối lượng riêng của vật liệu (kg/m^3); C là nhiệt dung (J/(kg.K)); k là độ dẫn nhiệt (W/(m.K)); u là vận tốc in (m/s); $Q_{\text{nguồn nhiệt}}$ là năng lượng laser phân bố cho vùng cần in của lớp in (W/m^3). Năng lượng nguồn laser được xác định trên cơ sở là tổng năng lượng hấp thụ, truyền dẫn và bức xạ như thể hiện ở Hình 2.

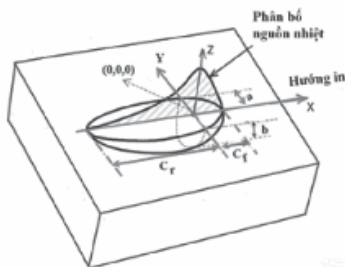
Năng lượng laser phân bố cho vùng cần in được xác định như sau:

$$Q_{\text{nguồn nhiệt}} = Q_{\text{công suất yêu cầu}} + Q_{\text{dẫn nhiệt}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = Q_{\text{nguồn laser đến}} - Q_{\text{đổi lưu}} - Q_{\text{bức xạ}} - Q_{\text{dẫn nhiệt}} \quad (3)$$

Hình 3 thể hiện các thông số của mô hình Goldak biểu diễn phân bố năng lượng laser [6], các thông số và giá trị tương ứng được sử dụng cho mô phỏng được thể hiện ở Bảng 1. Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Goldak được xác định như sau:

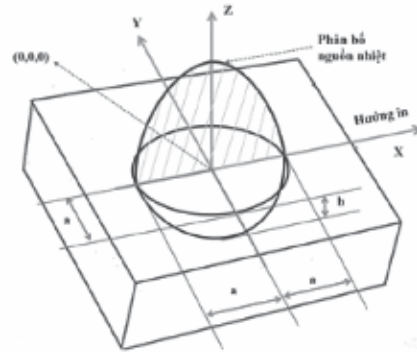
$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = Q \frac{6\sqrt{3}}{ab\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2}\right]} \left[\frac{f_f}{c_f} e^{\frac{-3x^2}{c_f^2}} + \frac{f_r}{c_r} e^{\frac{-3x^2}{c_r^2}} \right] \quad (4)$$



Hình 3. Mô hình Goldak biểu diễn phân bố năng lượng laser

Hình 4 thể hiện mô hình Gauss biểu diễn phân bố năng lượng laser [7, 8]. Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Gauss được xác định như sau:

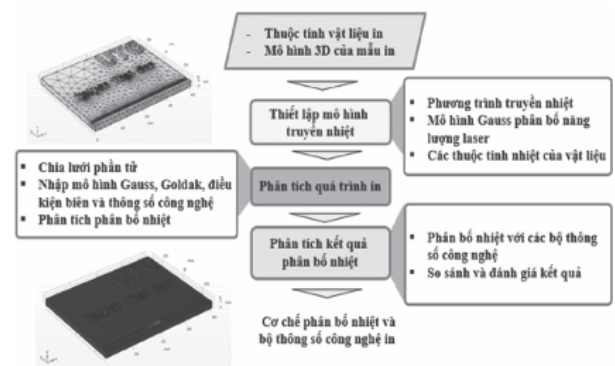
$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = 2Q \frac{6\sqrt{3}}{a^2 b \pi \sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2} + \frac{-3x^2}{a^2}\right]} \quad (5)$$



Hình 4. Mô hình Gauss biểu diễn phân bố năng lượng laser

3. PHÂN BỐ NHIỆT TRONG QUÁ TRÌNH IN SLM

Để xác định phân bố nhiệt trong quá trình in, các bước thực hiện được thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Các bước xác định phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ

Cơ chế phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ in đã được xác định ứng dụng phần

mềm Comsol với các bước từ thiết lập mô hình truyền nhiệt, phân tích quá trình in tới phân tích kết quả phân bố nhiệt. Trong bước thiết lập mô hình truyền nhiệt, mô hình nhiệt (1), mô hình Gauss, mô hình Goldak thể hiện năng lượng laser phân bố (4) (5) và các thuộc tính vật liệu được nhập vào môi trường Comsol. Để phân tích quá trình in, phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng, mô hình in được chia lưới cho phân tích; điều kiện biên và các thông số công nghệ in được thiết lập. Kết quả phân bố nhiệt với các bộ thông số công nghệ in khác nhau

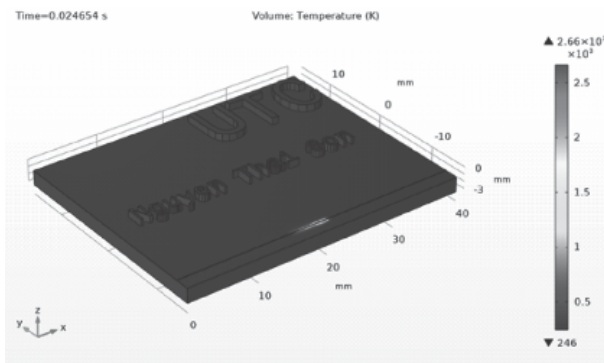
như công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in, và khoảng cách giữa các đường in nhằm xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp.

Trong nghiên cứu này, vì tính chất lặp lại của các đường in nên chỉ nghiên cứu quá trình in một đường đơn để xác định giá trị của nhiệt độ khi in. Bảng 1 thể hiện các giá trị được sử dụng để xác định trường nhiệt với mô hình Goldak và mô hình Gauss.

Bảng 1. Giá trị của các thông số mô phỏng [9, 10]

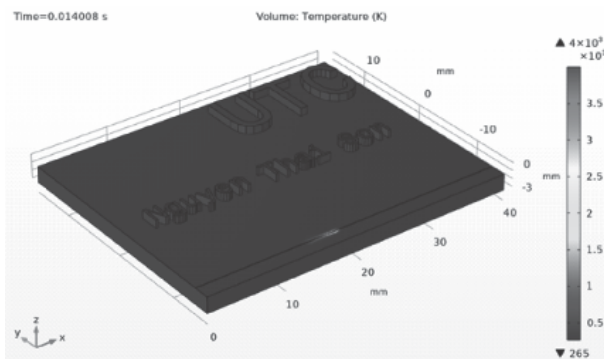
Ký hiệu	Thông số	Mô hình Goldak	Mô hình Gauss
x_0	Tọa độ x ban đầu	0 [mm]	0 [mm]
y_0	Tọa độ y ban đầu	0 [mm]	0 [mm]
Q	Công suất nguồn laser từ máy	150 [W]	150 [W]
a	Chiều rộng chùm tia laser theo trục y	0.4205 [mm]	0.4205 [mm]
b	Chiều sâu thâm nhập của chùm tia laser theo trục z	0.1682 [mm]	0.1682 [mm]
C_f	Chiều dài phân bố phía trước của chùm tia laser theo trục x	0.4205 [mm]	0.4205 [mm]
C_r	Chiều dài phân bố phía sau của chùm tia laser theo trục x	0.84 [mm]	0.4205 [mm]
f_f	Hệ số nguồn nhiệt phía trước của chùm tia laser	2/3	1
f_r	Hệ số nguồn nhiệt phía sau của chùm tia laser	4/3	1
u	Vận tốc in	1500 [mm/s]	1500 [mm/s]
C	Nhiệt dung	$710 \cdot 10^{-3}$ [J/(g.K)]	$710 \cdot 10^{-3}$ [J/(g.K)]
k	Hệ số dẫn nhiệt	$7.5 \cdot 10^{-3}$ [W/(mm.K)]	$7.5 \cdot 10^{-3}$ [W/(mm.K)]
T_a	Nhiệt độ môi trường	293 [K]	293 [K]
h_c	Hệ số truyền nhiệt đối lưu	186.3 [W/(mm ² .K)]	186.3 [W/(mm ² .K)]
h_r	Hệ số truyền nhiệt bức xạ	4.4 [W/(mm ² .K)]	4.4 [W/(mm ² .K)]
h	Chiều dày lớp in	0.045 [mm]	0.045 [mm]
Ha	Khoảng cách giữa hai đường in	0.07 [mm]	0.07 [mm]





Hình 6. Phân bố nhiệt với mô hình Gauss

Hình 6 mô tả trường nhiệt độ khi in SLM cho vật liệu hợp kim Titan với các thông số mô hình Gauss như trong bảng 1. Với mô hình Gauss, áp dụng với công suất nguồn laser là 150 W, vận tốc in là 400 mm/s, nhiệt độ tại vùng nóng chảy vật liệu đạt được là $T_m = 2660$ K.



Hình 7. Phân bố nhiệt với mô hình Goldak

Áp dụng với mô hình Goldak, trong cùng điều kiện giống nhau về công suất (150 W), vận tốc in (400 mm/s), nhiệt độ tại vùng nóng chảy vật liệu đạt được là $T_m = 4000$ K.

Lặp lại quá trình trên với các bộ thông số công nghệ in khác nhau (trong trường hợp nghiên cứu này chỉ thay đổi công suất nguồn laser và vận tốc in), giá trị của T_m được thể hiện ở Bảng 2. Trong đó với công suất nguồn laser 150 W, giá trị của chiều sâu thâm nhập của chùm laser là 1.682 mm (như thể hiện ở

bảng 1); với công suất nguồn lớn hơn, giá trị của chiều sâu thâm nhập của chùm laser sẽ lớn hơn. Cụ thể, với công suất nguồn laser là 250 W giá trị của $b = 0.35$ mm; với công suất nguồn laser là 350 W giá trị của $b = 0.5$ mm đã được sử dụng cho quá trình mô phỏng.

Bảng 2. Giá trị nhiệt độ tại vùng nóng chảy (T_m) với mô hình Goldak và Gauss

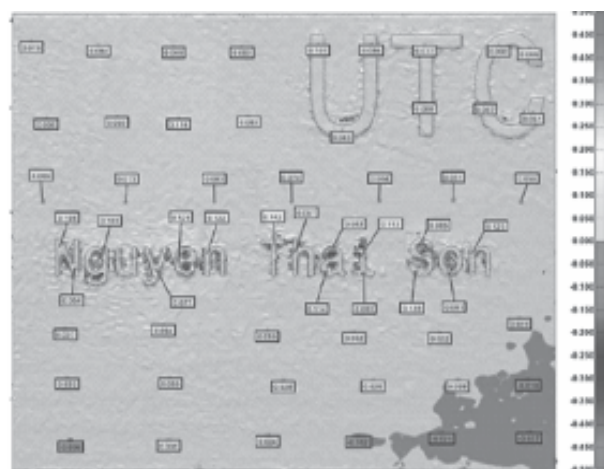
STT	Nguồn laser (W)	Vận tốc in (mm/s)	Mô hình Goldak T_m (K)	Mô hình Gauss T_m (K)
1	150	400	4000	2610
2	350	400	4030	2750
3	150	1500	3630	2480
4	350	1500	3900	2720
5	250	950	4090	2660

Từ kết quả Bảng 2 ta nhận thấy rằng, với công suất nguồn laser 150 W, 250 W, và 350 W; vận tốc in 400 mm/s, 950 mm/s, và 1500 mm/s giá trị trường nhiệt độ áp dụng mô hình Gauss và mô hình Goldak đều lớn hơn nhiệt độ chảy yêu cầu của vật liệu hợp kim Titan là 1877 K [11]. Tuy vậy, giá trị đạt được thông qua mô phỏng áp dụng mô hình Goldak là quá lớn, và đều lớn hơn nhiệt độ bay hơi của vật liệu hợp kim Titan là 3533 K [12].

Từ kết quả Bảng 2, áp dụng mô hình Gauss, giá trị nguồn công suất laser $Q = 150$ W và vận tốc in $u = 1500$ mm/s là phù hợp cho quá trình in SLM với vật liệu hợp kim Titan. Sử dụng kết quả này với bộ thông số công nghệ $Q = 150$ W, $u = 1500$ mm/s và chiều dày in 0.03 mm, kết quả in trên máy in 3D FF-M180D với bột hợp kim Titan được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Mẫu in 3D trên máy in FF-M180D



Hình 9. Đánh giá độ chính xác hình học của mẫu in 3D

Kết quả mẫu in có độ chính xác hình học đạt được cao thông qua phương pháp quét 3D mẫu in và so sánh với mô hình 3D ban đầu như thể hiện ở Hình 9 với độ lệch là 0.142 mm (thể hiện bởi màu đỏ).

4. KẾT LUẬN

Xác định phân bố nhiệt trong quá trình in SLM trong mối liên hệ với các thông số công nghệ in là rất cần thiết đối với quá trình in thực tế nhằm sử dụng hiệu quả thiết bị và đảm bảo

chất lượng sản phẩm in. Nghiên cứu này đề xuất bộ thông số công nghệ in phù hợp cho quá trình in SLM trên cơ sở xác định giá trị nhiệt độ nóng chảy T_m của vật liệu hợp kim Ti6Al4V. Để xác định được T_m , phương trình truyền nhiệt đã được thiết lập với mô hình phân bố nguồn nhiệt laser được xét theo cả mô hình phân bố Goldak và mô hình phân bố Gauss. Trên cơ sở đó, phần mềm Comsol với phương pháp phần tử hữu hạn đã được sử dụng để mô phỏng phân bố trường nhiệt độ khi in theo phương pháp in SLM. Từ kết quả mô phỏng bộ thông số công nghệ bao gồm công suất nguồn laser 150 W, vận tốc in 1500 mm/s, và chiều sâu in 0.03 mm đã được sử dụng để in trên máy in 3D – FF-M180D. Kết quả mẫu in cho độ chính xác hình học cao.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài mã số B2025-GHA-06.❖

Ngày nhận bài: 09/6/2025

Ngày phản biện: 30/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Kumar R., Kumar M., Chohan J.S., “The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review”. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 828-850.
- [2]. Rasiya G., Shukla, A., Saran, K., “Additive Manufacturing-A Review”. Materials Today: Proceedings, 2021, 47, 6896-6901.
- [3]. Fu C.H., Guo Y.B., “3-Dimensional finite element modeling of selective laser melting Ti-6Al-4V alloy”. Proc 25th Annu Int Solid Freeform Fabr Symp, 2014, 1129-1144.
- [4]. Park H.S., Ansari M.J., “Numerical investigation and an effective predicting system on the Selective Laser Melting (SLM) process with Ti6Al4V alloy”. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2008, 400, 042046.



- [5]. Roberts I.A., “*Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing*”. Dissertation, University of Wolverhampton, 2012.
- [6]. Samad Z., Nor N.M., Fauzi E.R.I., “*Thermo-mechanical simulation of temperature distribution and prediction of heat-affected zone size in MIG welding process on aluminium alloy EN AW 6082-T6*”. IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng. 2019, 530.
- [7]. Zhang Z., Huang Y., Kasinathan A.R., Shahabad S.I., Ali U., Mahmoodkhani Y., Toyserkani E., “*3-Dimensional heat transfer modeling for laser powder-bed fusion additive manufacturing with volumetric heat sources based on varied thermal conductivity and absorptivity*”. Opt. Laser Technol. 2019, 109, 297-312.
- [8]. Liu S., Zhu H., Peng G., Yin J., Zeng X., “*Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis*”. Mater. Des. 2018, 142, 319-328.
- [9]. Nain V., Engel T., Carin M., Boisselier D., Seguy L., “*Development of an elongated ellipsoid heat Source model to reduce computation time for directed energy deposition process*”. Front Mater, 2021, 8:747389
- [10]. Ansari P., Rehman A.U., Pitir F., Veziroglu S., Mishra Y.K., Aktas O.C., Salamci M.U., “*Selective Laser Melting of 316L Austenitic Stainless Steel: Detailed Process Understanding Using Multiphysics Simulation and Experimentation*”. Metals, 2021, 11, 1076.
- [11]. John J.Z.L., William L.J., Rhima W.K., “*Thermal expansion of liquid Ti-6Al-4V measured by electrostatic levitation*”. Applied Physics Letters, 2006, 89, 111913.
- [12]. Nain V., “*Efficient thermomechanical modeling of large parts fabricated by Directed Energy Deposition Additive Manufacturing processes*”. PhD Thesis, 2023.

ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO (AI) TRONG DỰ ĐOÁN ẢNH HƯỞNG CỦA LƯỢNG CHẠY DAO VÀ TỐC ĐỘ TRỤC CHÍNH ĐẾN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT KHI GIA CÔNG BIÊN DẠNG 3D VẬT LIỆU NHÔM 7075-T6 BẰNG DAO PHAY CẦU TRÊN MÁY PHAY CNC

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI) IN PREDICTING THE EFFECT OF FEED RATE AND SPINDLE SPEED ON SURFACE ROUGHNESS DURING 3D PROFILE MILLING OF 7075-T6 ALUMINUM ALLOY USING A BALL-END MILL ON CNC MILLING MACHINE

Hoàng Xuân Lâm

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu về ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) để dự đoán độ nhám bề mặt (R_a) khi phay biên dạng 3D vật liệu hợp kim nhôm 7075-T6 bằng dao phay cầu. Hai thông số công nghệ chính là lượng chạy dao (F) và tốc độ trục chính (S) được khảo sát trong khoảng $S = 2000 \div 4000$ vòng/phút, $F: 200 \div 800$ mm/phút. Dữ liệu thực nghiệm được sử dụng để huấn luyện hai mô hình AI gồm Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) và Random Forest (RF). Kết quả cho thấy mô hình RF cho độ chính xác cao hơn ANN với sai số nhỏ ($0.01 \mu\text{m}$), đã đưa ra dự đoán chính xác R_a và hỗ trợ xác định chế độ cắt tối ưu có kiểm chứng bằng thực nghiệm. Do vậy ứng dụng AI góp phần giảm chi phí và thời gian thí nghiệm trong thực tế.

Từ khóa: Phay biên dạng 3D; Hợp kim nhôm 7075-T6; Dao phay cầu; Độ nhám bề mặt; Lượng chạy dao; Tốc độ trục chính; Trí tuệ nhân tạo.

ABSTRACT

This study investigates the application of Artificial Intelligence (AI) to predict surface roughness (R_a) during 3D profile milling of 7075-T6 aluminum alloy using a ball-end mill. Two main machining parameters, feed rate (F) and spindle speed (S), are examined within the ranges of $S = 2000 \div 4000$ rpm and $F = 200 \div 800$ mm/min. Experimental data are used to train two AI models: Artificial Neural Network (ANN) and Random Forest (RF). The results show that the RF model achieves higher accuracy than ANN, with a minimal error of $0.01 \mu\text{m}$, enabling precise prediction of R_a and assisting in the determination of optimal cutting conditions. The application of AI contributes to reducing experimental cost and time in practice.

The research aims to apply AI to predict the influence of F and S on surface roughness, thereby optimizing cutting parameters. The predicted results are experimentally validated to identify optimal cutting conditions, improve machining efficiency, and reduce production costs.

Keywords: 3D profile milling; 7075-T6 aluminum alloy; Ball-end mill; Surface roughness; Feed rate; Spindle speed; Artificial intelligence. 

1. GIỚI THIỆU

Trong gia công cơ khí chính xác, đặc biệt là phay biên dạng 3D vật liệu hợp kim nhôm 7075-T6 bằng dao phay cầu, độ nhám bề mặt là tiêu chí quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm. Việc xác định chế độ cắt tối ưu, bao gồm tốc độ trục chính (S) và lượng chạy dao (F), thường cần thực hiện nhiều thí nghiệm tốn kém thời gian và chi phí. Trí tuệ nhân tạo (AI) ứng dụng các thuật toán như ANN và Random Forest, đã chứng minh khả năng dự đoán và mô hình hóa hiệu quả các quá trình phi tuyến tính trong gia công. Vì vậy, nghiên cứu này lựa chọn ứng dụng AI để xây dựng mô hình dự đoán Ra và tìm ra chế độ cắt tối ưu nhằm nâng cao chất lượng và hiệu quả sản xuất.

Tuy nhiên, mối quan hệ giữa các thông số cắt và độ nhám bề mặt có tính phi tuyến, khiến việc xây dựng mô hình dự đoán chính xác trở nên khó khăn. Để giải quyết vấn đề này, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI), đặc biệt là các thuật toán học máy như mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) và Random Forest (RF), để dự đoán độ nhám bề mặt [4], [5].

Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học cho việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo để lựa chọn chế độ cắt tối ưu, giúp nâng cao chất lượng bề mặt gia công, tối ưu hóa quá trình sản xuất và giảm thiểu chi phí thử nghiệm.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hệ thống thí nghiệm

- Thí nghiệm được thực hiện trên máy phay CNC 3 trục Vcenter-85 (X,Y,Z:850,520,560; Smax 8000v/p; Fmax 2000mm/p), sử dụng dao phay cầu hợp kim $\Phi 8$ phủ DLC, vật liệu nhôm hợp kim 7075-T6 [1], [2].

- Thiết bị đo độ nhám: Máy đo Mitutoyo SJ-310.

- Phần mềm hỗ trợ: Dữ liệu thu thập sẽ được xử lý bằng Python, và các thuật toán học máy khác để xây dựng mô hình AI [5].

- Các thông số công nghệ chính ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt được khảo sát là:

- + Tốc độ trục chính (S): 2000 - 4000 vòng/phút;
- + Lượng chạy dao (F): 200 - 800 mm/phút;
- + Chiều sâu cắt (a_p): Cố định ở 0.2 mm;
- + Bước dịch dao ngang a_e : Cố định 0.15 mm;
- + Số lượng thí nghiệm: 10 ÷ 15 mẫu với các tổ hợp S, F khác nhau.

- Độ nhám trung bình Ra sẽ được đo sau mỗi lần gia công bằng Mitutoyo SJ-310, lấy trung bình từ 3 vị trí đo trên mẫu.

2.2. Công thức toán học mô hình AI

- Mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN): Công thức dự đoán của ANN giá trị đầu ra Ra được tính: $Ra = W_{out} * h + b_{out}$, $h_i = f(W_{in} * S + W_{i2} * F + b_i) = \max(0, x)$ (hàm kích hoạt ReLU) [5], [6].

- Cập nhật trọng số bằng Backpropagation.

Sau khi mô hình tính ra giá trị dự đoán $Ra_{dự đoán}$ so sánh với giá trị thực nghiệm $Ra_{thực tế}$. Sai số được tính bằng hàm mất mát Mean Squared Error (MSE) [5].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Ra_{thực\,tế} - Ra_{dự\,đoán})^2 \quad (1)$$

Thuật toán Backpropagation để cập nhật trọng số W và bias b nhằm giảm sai số:

$$W_{new} = W_{old} - \alpha \frac{\partial MSE}{\partial W}; b_{new} = b_{old} - \alpha \frac{\partial MSE}{\partial b} \quad (2)$$

- Mô hình Random Forest (RF): Dự đoán độ nhám được tính theo công thức [7]:

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i(S, F). \quad (3)$$

2.3. Chương trình huấn luyện mô hình AI

Chương trình Python được xây dựng dựa trên phương pháp đã được nghiên cứu trong các tài liệu về dự đoán độ nhám bề mặt bằng AI [5], [6]. Mô hình Random Forest (RF) được sử dụng để huấn luyện dự đoán trên tập dữ liệu thực nghiệm [5], [7]. Trong khi đó, Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) được huấn luyện bằng thuật toán Adam để tối ưu hóa trọng số [6]. Việc đánh giá mô hình dựa trên các chỉ số sai số phổ biến như MAE, RMSE và R² [5].

- Huấn luyện mô hình Random Forest [5], [7]:

```
def train_rf(X_train, y_train):
    model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)
    model.fit(X_train, y_train)
    return model
```

- Huấn luyện mô hình ANN [6]:

```
def train_ann(X_train, y_train):
    model = MLPRegressor(hidden_layer_sizes=(10, 10), activation='relu', solver='adam', max_iter=500, random_state=42)
    model.fit(X_train, y_train)
    return model
```

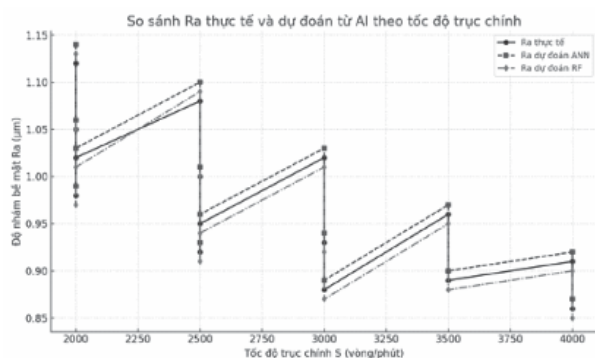
- Đánh giá mô hình [5]:

```
def evaluate(y_true, y_pred, name):
    mae = mean_absolute_error(y_true, y_pred)
    rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_true, y_pred))
    r2 = r2_score(y_true, y_pred)
    print(f'{name} - MAE: {mae:.3f}, RMSE: {rmse:.3f}, R^2: {r2:.3f}')
```

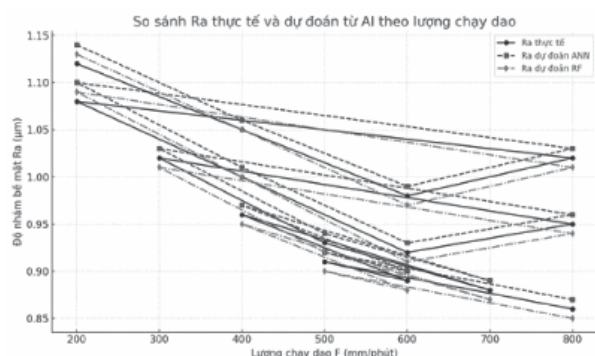
Bảng 1. So sánh kết quả dự đoán Ra của AI với thực nghiệm ban đầu

Mức thí nghiệm	Lượng chạy dao F (mm/phút)	Tốc độ trục chính S (v/phút)	Độ nhám thực tế Ra _{th} (μm)	Độ nhám dự đoán ANN Ra _{ANN} (μm)	Sai số ANN	Độ nhám dự đoán RF Ra _{RF} (μm)	Sai số RF
1	200	2000	1.12	1.14	0.01	1.13	0.01
2	400	2000	1.05	1.06	0.00	1.05	0.00
3	600	2000	0.98	0.99	0.01	0.97	0.01
4	800	2000	1.02	1.03	0.01	1.01	0.01
5	200	2500	1.08	1.10	0.00	1.09	0.01
6	400	2500	1.00	1.01	0.00	1.00	0.00
7	600	2500	0.92	0.93	0.01	0.91	0.01
8	800	2500	0.95	0.96	0.01	0.94	0.01
9	300	3000	1.02	1.03	0.01	1.01	0.01
10	500	3000	0.93	0.94	0.01	0.92	0.01
11	700	3000	0.88	0.89	0.01	0.87	0.01
12	400	3500	0.96	0.97	0.01	0.95	0.01
13	600	3500	0.89	0.90	0.01	0.88	0.01
14	500	4000	0.91	0.92	0.01	0.90	0.01
15	800	4000	0.86	0.87	0.01	0.85	0.01

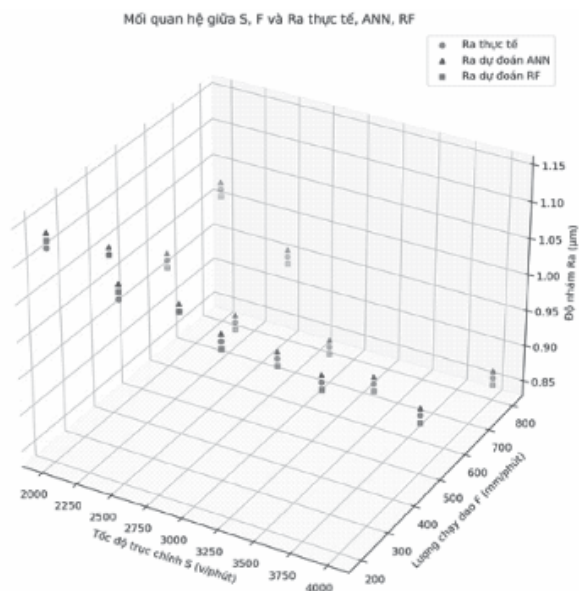




Hình 1. Biểu đồ so sánh thực tế và dự đoán của AI theo tốc độ trục chính



Hình 2. Biểu đồ so sánh thực tế và dự đoán của AI theo lượng chạy dao



Hình 3. Đồ thị thể hiện mối quan hệ F, S, Ra

Nhận xét về kết quả và tìm giá trị S, F tối ưu để đạt Ra nhỏ nhất dựa vào bảng 1.

- Phân tích xu hướng của độ nhám Ra:

+ Tốc độ trục chính S tăng: Độ nhám Ra có xu hướng giảm do dao cắt mượt hơn và ít rung động hơn [1], [2].

+ Lượng chạy dao F tăng từ 200 đến 600 mm/phút: Độ nhám Ra có xu hướng giảm do hiệu ứng cắt tối ưu.

+ Khi $F > 600$ mm/phút: Độ nhám Ra có thể tăng do dao chịu tải lớn hơn, gây rung động và gia công kém ổn định [3].

- Xác định giá trị S, F tối ưu:

+ Tốc độ trục chính S = 4000 vòng/phút;

+ Lượng chạy dao F = 800 mm/phút → Giá trị Ra nhỏ nhất: 0.86 µm.

- Dự đoán AI (ANN & RF):

+ RF dự đoán Ra = 0.85 µm, gần với thực tế hơn ANN (0.87µm);

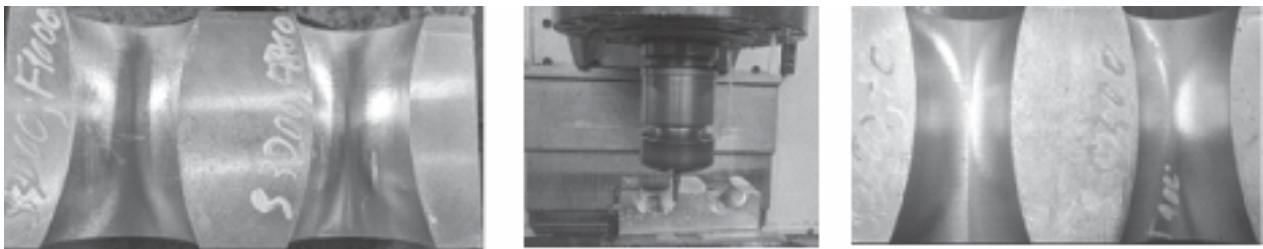
+ ANN có sai số lớn hơn RF, nhưng vẫn theo xu hướng giảm khi S tăng và F đạt mức tối ưu [4], [5].

3. KẾT QUẢ KIỂM CHỨNG DỰ ĐOÁN AI BẰNG THỰC NGHIỆM

Nhằm kiểm tra độ chính xác của mô hình AI, các thông số tối ưu (S = 4000 vòng/phút, F = 800 mm/phút) đã được thực nghiệm lại và so sánh với dự đoán từ ANN & RF.

Bảng 2. So sánh kết quả dự đoán AI và thực nghiệm lại

Mức thí nghiệm	Lượng chạy dao F (mm/phút)	Tốc độ trục chính S (v/phút)	Độ nhám thực tế Ra_{th} (μm)	Độ nhám dự đoán ANN Ra_{ANN} (μm)	Sai số ANN	Độ nhám dự đoán RF Ra_{RF} (μm)	Sai số RF
1	800	4000	0.86	0.86	0.01	0.85	0.01
2	700	4000	0.88	0.89	0.01	0.87	0.01
3	900	4000	0.89	0.90	0.01	0.88	0.01
4	800	3800	0.87	0.88	0.01	0.86	0.01
5	800	4200	0.85	0.86	0.00	0.84	0.01



Hình 4. Ảnh sản phẩm mẫu thí nghiệm

Nhận xét:

- Tại điểm tối ưu $S = 4000$ vòng/phút, $F = 800$ mm/phút, Ra thực tế $0.86 \mu m$, khớp với dự đoán của RF (sai số $0.01 \mu m$).

- Mô hình RF dự đoán chính xác hơn ANN, với sai số nhỏ hơn.

- ANN có sai số cao hơn một chút nhưng vẫn thể hiện đúng xu hướng giảm Ra khi S tăng và F đạt mức tối ưu.

Kết luận:

1) Khi phay biên dạng 3D hợp kim nhôm 7075-T6. Tốc độ S tăng từ $2000 \rightarrow 4000$ vòng/phút và F tăng từ $200 \rightarrow 600$ mm/phút.

2) Thông số tối ưu từ thực nghiệm $S =$

4000 vòng/phút, $F = 800$ mm/phút, Ra $0.86 \mu m$ và AI dự đoán $S = 4000$ vòng/phút, $F = 800$ mm/phút, Ra $0.85 \mu m$, sai số dự đoán ($0.01 \mu m$).

4. KẾT LUẬN

1) Cả hai mô hình ANN và RF đều dự đoán độ nhám Ra rất gần với giá trị đo thực tế tại các mức thí nghiệm, với sai số nhỏ ($0.00 \div 0.01 \mu m$). Mô hình RF cho kết quả dự đoán ổn định và chính xác hơn ANN tại tất cả các mức kiểm chứng, có thể áp dụng để hỗ trợ lựa chọn thông số cắt tối ưu trong gia công thực tế;

2) Các mô hình huấn luyện có độ tin cậy và có khả năng dự đoán Ra cao kết quả huấn luyện được minh họa trên hình 1, hình 2 và hình 3. Điều đó cho phép và tối ưu hóa chế độ cắt, giảm số lần thí nghiệm thực tế, từ đó tiết kiệm được thời gian và nguyên liệu góp phần



nâng cao chất lượng, hiệu quả trong thiết kế, gia công cơ khí. ❖

Ngày nhận bài: **20/5/2025**

Ngày phản biện: **12/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lưu Văn Tuấn, “Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ công nghệ đến độ nhám bề mặt và tốc độ bóc tách vật liệu khi phay hợp kim nhôm 7075 trên máy phay CNC DMC 835V”. Luận văn thạc sĩ kỹ thuật cơ khí, Trường Đại học Lâm nghiệp, 2023.
- [2]. Trần Công Chi, Lưu Văn Tuấn, Nguyễn Văn Tựu, và Trần Văn Tường, “Tối ưu hóa ảnh hưởng của một số thông số gia công đến nhám bề mặt và tốc độ bóc tách vật liệu khi phay hợp kim nhôm 7075”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Thái Nguyên, Tập 228, Số 02, tr. 83-90, 2022.
- [3]. Phạm Duy Tùng, Lê Quang Hòa, “Ảnh hưởng của thông số cắt đến độ nhám bề mặt khi phay CNC”. Hội nghị khoa học toàn quốc về Cơ khí chính xác và Gia công CNC, tr. 120-126, 2020.
- [4]. Trần Công Chi và cộng sự, “Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt đến chất lượng bề mặt khi gia công phay nhôm 7075-T6”. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Cơ khí, 32(4), tr. 55-62, 2022.
- [5]. Zhang, X., Zhang, S., Li, X., & Wang, X. (2018), “Prediction of surface roughness in CNC milling based on machine learning: A comparative study”. Procedia CIRP, 77, 187-192.
- [6]. Li, X., & Zhang, S. (2021), “A deep learning-based model for predicting surface roughness in high-speed milling”. Journal of Manufacturing Processes, 68, 201-210.
- [7]. Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003), “Predicting surface roughness in machining: a review”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(8), 833-844.

SO SÁNH KHẢ NĂNG CHỐNG MÀI MÒN CỦA LỚP PHỦ PLASMA ĐIỆN PHÂN VÀ LỚP MẠ CRÔM TRÊN NỀN THÉP DỰA TRÊN THỰC NGHIỆM

EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE WEAR RESISTANCE OF PLASMA ELECTROLYTIC OXIDE COATINGS AND CHROMIUM PLATING ON STEEL SUBSTRATES

Bùi Mạnh Cường¹, Dương Thế Tuấn Anh¹, Nguyễn Bích Ngọc², Vương Anh Tuấn³,
Phan Văn Trường⁴, Thân Đình Thực¹, Đặng Minh Chiến¹, Đỗ Văn Sĩ^{1,*}

¹Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

²Khoa Hoá - Lý kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự

³Viện Công nghệ Mô phỏng, Học viện Kỹ thuật quân sự

⁴Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu so sánh tính chất ma sát và khả năng chống mài mòn của lớp phủ oxit tạo ra bằng phương pháp oxy hóa điện phân plasma (PEO) với lớp mạ crôm truyền thống trên nền thép. Thông qua các nghiên cứu thí nghiệm đã chỉ ra rằng tuy lớp phủ PEO có hệ số ma sát lớn hơn lớp mạ crôm nhưng đổi lại khả năng chống mài mòn vượt trội hơn hẳn lớp mạ crôm trong một số điều kiện làm việc cụ thể. Những kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng của lớp phủ PEO như một giải pháp thay thế thân thiện với môi trường cho lớp mạ crôm trong các chi tiết cơ khí chịu tải trượt.

Từ khóa: Điện phân plasma; Crôm; Ma sát; Mài mòn; UMT.

ABSTRACT

This paper presents a comparative study on the frictional properties and wear resistance of oxide coatings produced by Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) and traditional hard chromium plating on steel substrates. Experimental investigations reveal that although PEO coatings exhibit a higher coefficient of friction than chromium plating, they demonstrate significantly superior wear resistance under specific operating conditions. These findings highlight the potential of PEO coatings as an environmentally friendly alternative to hard chrome plating for sliding mechanical components.

Keywords: Plasma electrolysis; Chromium; Friction; Abrasion; UMT.



1. TỔNG QUAN

Trong những thập kỷ gần đây, xu hướng sử dụng các lớp phủ kỹ thuật nhằm tăng cường độ bền mài mòn và chống ăn mòn của vật liệu nền đã và đang phát triển mạnh mẽ. Trong đó, lớp mạ crôm cứng là một trong những công nghệ phổ biến nhất, nhờ khả năng tạo lớp bảo vệ có độ cứng cao (~850-1000 HV), hệ số ma sát ổn định và khả năng chịu mài mòn tốt. Tuy nhiên, phương pháp này sử dụng dung dịch chứa Cr^{6+} – một tác nhân gây ung thư và ô nhiễm môi trường nghiêm trọng. Do vậy, việc tìm kiếm giải pháp thay thế thân thiện môi trường, hiệu quả tương đương hoặc vượt trội, đang là hướng nghiên cứu được ưu tiên hàng đầu.

Phương pháp oxy hóa điện phân plasma (Plasma Electrolytic Oxidation – PEO), hay còn gọi là micro-arc oxidation, là một trong các giải pháp tiềm năng thay thế mạ crôm cứng trong một số ứng dụng. Phương pháp này tạo ra lớp phủ oxit bám chắc trên bề mặt kim loại nền (chủ yếu là kim loại “vạn” như Al, Mg, Ti...), có cấu trúc dạng gốm với độ cứng cao, tính cách điện và khả năng chống ăn mòn vượt trội. Bản chất của quá trình là sự kết hợp giữa điện hóa học và hiện tượng phóng điện plasma tại bề mặt điện cực trong môi trường dung dịch điện phân loãng, dẫn đến sự hình thành lớp oxit phức tạp từ cả kim loại nền và thành phần dung dịch.

Tại Việt Nam, ứng dụng công nghệ PEO còn tương đối mới. Công trình nghiên cứu [1] do Viện Độ bền Nhiệt đới (Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga) thực hiện là một trong những nghiên cứu đầu tiên và bài bản về công nghệ PEO trên hợp kim nhôm D16. Trong đề tài này, nhóm tác giả đã xây dựng quy trình công nghệ, khảo sát ảnh hưởng của các thông số như thành phần dung dịch, mật độ dòng điện, tỷ lệ dòng

anot/catot đến độ dày, độ cứng, hình thái và tính chất cơ lý của lớp phủ thu được. Các kết quả thử nghiệm cho thấy lớp phủ đạt độ cứng lên tới 1500 HV, hệ số ma sát dao động từ 0,04 đến 0,7 và khả năng chịu mài mòn tốt theo tiêu chuẩn GOST P 9.318-2013.

Trong công trình [2], các tác giả đã đưa ra vấn đề tổng quan toàn diện về quy trình PEO, từ cơ chế hình thành màng, các thông số vận hành đến tính chất lớp phủ đạt được. Đã mô tả ba lớp chính: lớp rào cản mỏng, lớp working compacts và lớp công nghệ ngoài cùng cũng như trình bày các đoạn quá trình: breakdown/plasma/phục hồi, giúp tạo thành các lớp oxide micro-arc đặc trưng, các kết quả nghiên cứu được thực hiện trên nhiều kim loại (Al, Mg, Ti), cải thiện tính chịu mài mòn, chống ăn mòn, cách điện, chịu nhiệt và làm nổi bật khả năng phủ đồng đều trên bề mặt phức tạp. Phương pháp đưa vào các phụ gia hữu cơ (alcohols, acid, amines, carbohydrate, surfactants...) giúp điều chỉnh xung tia plasma, từ đó làm giảm điện áp breakdown và bọt khí, giảm kích thước lỗ chân lông được đề xuất bởi nhóm tác giả [3], trong đó các phụ gia hữu cơ (alcohols, acid, amines, carbohydrate, surfactants...) giúp điều chỉnh xung tia plasma, từ đó làm giảm điện áp breakdown và bọt khí, giảm kích thước lỗ chân lông. Cơ chế của phương pháp này là các phân tử hữu cơ hấp thụ tại bề mặt điện cực, ảnh hưởng trực tiếp tới quá trình phóng điện (soft plasma), từ đó điều khiển cấu trúc oxide hình thành. Kết quả nghiên cứu đã cải thiện bề mặt PEO cho tăng khả năng chống ăn mòn, ứng dụng trong kim loại nhẹ, bộ phận chịu mài mòn. Công trình [4] Aliofkhazraei và các cộng sự đã phân tích sâu giai đoạn phóng điện anodic/cathodic, micro- và macro-discharge, ảnh hưởng đến cấu trúc lớp. Trình bày hóa-lý-plasma phức tạp để giải thích sự hình thành micro discharge và pha oxide tạo thành. Kết quả nghiên cứu đã giúp

tăng khả năng chống ăn mòn, ma sát, độ bền cơ học, chức năng sinh học (compatibility), photocatalysis, trang trí và ứng dụng trong y khoa, hàng không, ô tô, môi trường.

Tác giả công trình [5] đã kết hợp PEO với vật liệu polymer/silane + oxide nano (TiO_2 , SiO_2 ...), đạt khả năng siêu kỵ nước ($\text{CA} > 150^\circ$). Trình bày cơ chế PEO tạo bề mặt microporous, sau đó phủ/hấp phụ polymer hạ bề mặt năng lượng để đạt tính kỵ nước và barrier giúp chống ăn mòn. Nghiên cứu này cho phép ứng dụng bảo vệ bề mặt trong môi trường ẩm/nhiệt (chống ăn mòn muối biển), tự làm sạch/anti-icing; tiềm năng lớn trong hàng hải và công nghiệp ngoài trời. Nghiên cứu của Aljohani et và cộng sự [6] đã dùng sóng bipolar cao tần tạo lớp mỏng – đặc – ít lỗ hơn; tăng hiệu suất chống ăn mòn đến gấp ~8 lần so với mẫu gốc. Cơ chế của phương pháp sóng bipolar với duty cycle cao làm giảm lỗ, tăng mật độ ion oxide. Nghiên cứu này giúp tối ưu PEO trên hợp kim Mg (AZ91), cải thiện cho các bộ phận nhẹ nhưng cần chống ăn mòn, ví dụ y tế, ô tô. Lu et và cộng sự [7] đã thêm 0.5-2 wt.% GNPs vào PEO coated AZ31 (trong ethanol) làm giảm COF từ ~0.74 đến ~0.07 và giảm đáng kể tỉ lệ mòn nhờ tribolayer graphene, bản chất graphene nanoplatelets tự tạo lớp bôi trơn trên bề mặt khi trượt. công trình nghiên cứu đã giúp tối ưu cho chi tiết nhẹ trong ô tô, hàng không, sử dụng dung môi thân thiện môi trường. Tiếp theo Liu, Peng & Lang và cộng sự [8] đã nghiên cứu tính chất ma sát mài mòn của lớp phủ PEO phủ TC4 giảm ma sát đáng kể trong cả khô và có dầu; dưới dầu, tải trọng ép (compressive stress) là nguyên nhân chính phá hủy lớp phủ, trong nghiên cứu đã chỉ ra PEO tạo lớp ceramic oxide (TiO_2) bảo vệ; dầu bôi trơn làm giảm shear stress, nghiên cứu này đã cải thiện tuổi thọ chi tiết chịu ma sát trên TC4 – phù hợp cho dầu máy và thủy lực. Trong công trình nghiên cứu [9] Azar và cộng sự đã

nghiên cứu khi bôi dầu PAO làm hệ số ma sát giảm xuống ~0.07 nhờ sự phân giải MoDTC và hình thành MoS_2 trên bề mặt PEO. Nghiên cứu này đã tối ưu cho hệ thống vòng bi, chi tiết trượt titanium trong môi trường dầu động cơ. Trong công trình của Li et al [10] đã kết hợp micro arc oxidation (MAO) và dầu PAO đã làm cho hệ số ma sát giảm xuống ~0.062 và tốc độ mòn đạt được $\sim 4.3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, nguyên nhân là nhờ phối hợp OLC (đăng bám bề mặt) và MoDTC phân giải thành MoS_2 , tạo tribofilm kép. Nghiên cứu này đã ứng dụng phù hợp với chi tiết titanium chịu tải ma sát cao, nhiệt độ cao trong công nghiệp ô tô, năng lượng.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu mới dừng ở dạng giới thiệu hoàn thiện công nghệ, chưa có nhiều kết quả thực nghiệm. Việc nghiên cứu thực nghiệm sẽ giúp hiểu rõ hơn về cơ chế mài mòn và hiệu quả thực tế của lớp phủ trong các điều kiện làm việc khác nhau. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành nghiên cứu so sánh về hệ số ma sát và khả năng chống mài mòn của lớp phủ plasma điện phân so với lớp mạ crom trên nền thép truyền thống dựa trên thực nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM G133 [12] bằng cách sử dụng hệ thống đo ma sát mài mòn vạn năng UMT (Universal Multi-Specimen Test System) do hãng CERT sản xuất, được trang bị tại Phòng Thí nghiệm Cơ học máy, Học viện Kỹ thuật quân sự.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT PHƯƠNG PHÁP OXY HÓA ĐIỆN PHÂN PLASMA (PEO)

Oxy hóa điện phân plasma (Plasma Electrolytic Oxidation – PEO) là một quá trình xử lý bề mặt phức tạp, trong đó các phản ứng điện hóa và phóng điện plasma xảy ra đồng thời tại bề mặt điện cực, tạo ra lớp oxit có độ cứng cao và khả năng chống mài mòn vượt trội. Quá trình được tiến hành trong dung dịch điện phân



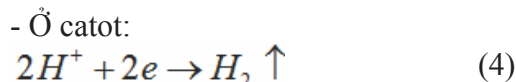
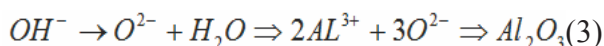
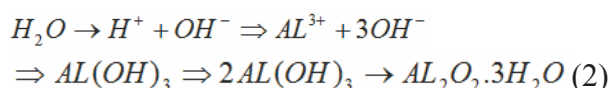
loãng, dưới mật độ dòng điện không đổi, với hiệu điện thế tăng dần theo thời gian.

Quá trình PEO thường trải qua bốn giai đoạn [11]: (I) tạo lớp oxit mỏng ban đầu (anodizing), (II) xuất hiện các điểm phóng điện vi hồ quang (micro-arc), (III) phóng điện ổn định kèm sự tăng trưởng lớp oxit chứa $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, và (IV) phóng hồ quang mạnh gây phá hủy lớp phủ nếu vượt ngưỡng điện áp. Giai đoạn III là giai đoạn hình thành lớp làm việc quyết định đến độ cứng và khả năng chịu mài mòn của lớp phủ.

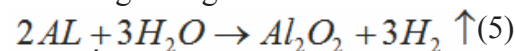
Cơ chế hình thành lớp phủ gồm các phản ứng oxy hóa kim loại nền tại anot, kết tủa và kết tinh oxit nhôm trong pha plasma, đồng thời xảy ra sự đông đặc tại bề mặt. Lớp phủ PEO có thể đạt độ cứng 800-1500 HV, độ dày 60-90 μm và khả năng chống mài mòn cao theo GOST P 9.318-2013, phụ thuộc vào thành phần dung dịch và chế độ dòng điện. Sự hình thành lớp phủ oxit trên bề mặt điện cực thể hiện qua các giai đoạn phản ứng sau:



- Trong dung dịch và màng oxit anot:



Phản ứng chung:



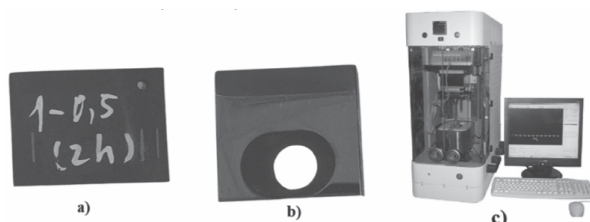
Cơ chế quá trình điện phân plasma hợp kim nhôm trong dung dịch diễn ra như sau [1,

11]: Trước tiên diễn ra quá trình anot hóa bề mặt hợp kim tạo thành lớp màng mỏng cách điện. Tiếp theo, giai đoạn 2 diễn ra sự phóng điện và tăng chiều dày lớp phủ sẽ diễn ra vì sự tương tác của bề mặt kim loại ở các đáy của lỗ và các nguyên tử kim loại trong thành phần hợp kim ở dạng “hơi” với tác nhân oxy hóa plasma (ví dụ: O, O-, O₂-, O₃-, F, F-, ...), tiếp theo diễn ra quá trình dịch chuyển plasma lên bề mặt lớp phủ, ở đây plasma bị làm lạnh, đông cứng lại và dẫn đến hình thành lớp phủ, thành phần chính lớp phủ lúc này là các oxit kim loại của hợp kim. Như vậy, khi điện phân plasma hợp kim nhôm sẽ tạo thành các vùng nóng chảy đặc trưng như thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Hình thái bề mặt lớp phủ plasma [1, 11]

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

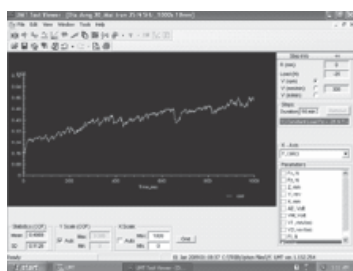


Hình 2. Mẫu và máy thí nghiệm (a - Mẫu phủ lớp điện phân plasma; b - Mẫu mạ crom; c - Máy thí nghiệm)

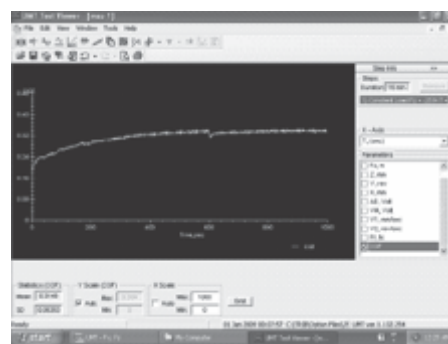
Trước tiên, nhóm tác giả tiến hành thí

nghiệm xác định hệ số ma sát trên 2 loại mẫu. Loại mẫu thử thứ nhất làm từ hợp kim D-16 có kích thước dài x rộng x dày là 50 x 40 x 3 mm được phủ lớp điện phân plasma, quá trình điện phân plasma được thực hiện bằng cách sử dụng nguồn điện AC tần số 50 Hz, mật độ dòng điện 15A/dm². Các mẫu hợp kim nhôm D-16 được nối với anot, bể điện phân được nối với catod, bể điện phân được làm bằng thép không gỉ và được làm mát bằng nước, duy trì nhiệt độ của dung dịch điện phân nhỏ hơn 35 °C để tránh ảnh hưởng bất lợi đến quá trình hình thành lớp phủ. Thời gian tiến hành điện phân 2 giờ, dung dịch điện phân là Na₂O.(SiO₂)_n (12 g/L), NaOH (2 g/L). Loại mẫu thử 2 được mạ crôm có kích thước dài x rộng x dày là 45 x 40 x 15 mm. Thí nghiệm xác định hệ số ma sát, mài mòn theo tiêu chuẩn ASTM G133 [12] được thực hiện trên hệ thống đo ma sát mài mòn vạn năng UMT (Universal Multi-Specimen Test System) do hãng CERT sản xuất. Hệ thống này được trang bị tại Phòng Thí nghiệm Cơ học máy, Học viện Kỹ thuật quân sự. Mẫu và máy thí nghiệm được thể hiện như trên Hình 2.

Mỗi loại mẫu được tiến hành thí nghiệm 3 lần. Kết quả thí nghiệm xác định hệ số ma sát của h loại mẫu được thể hiện trên Hình 3. Kết quả thí nghiệm cho thấy hệ số ma sát của mẫu mạ plasma là 0,4069 lớn hơn mẫu được mạ crôm với hệ số ma sát là 0,3149, nghĩa là mẫu mạ plasma có hệ số ma sát lớn hơn 29,2 % so với mẫu được mạ crôm.



a)



b)

Hình 3. Hệ số ma sát của các lớp phủ (a - Hệ số ma sát mẫu plasma; b - Hệ số ma sát mẫu mạ crôm)

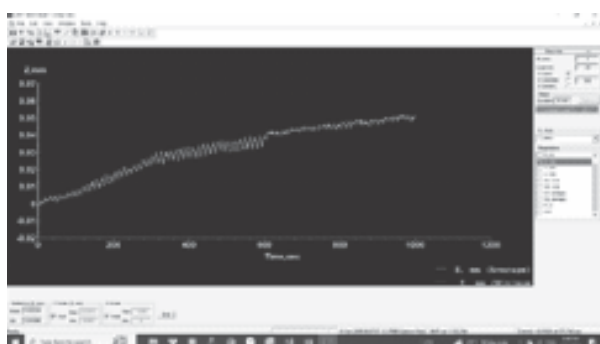
Tiếp theo tiến hành thí nghiệm so sánh khả năng chống mài mòn của 2 loại mẫu, thời gian thí nghiệm 1000 giây theo tiêu chuẩn ASTM G133 [12]. Kết quả thí nghiệm trên Hình 5 cho thấy rằng chiều sâu mòn của lớp phủ điện phân plasma sau 1000 giây làm việc là 0,03124, trong khi của lớp mạ crôm là 0,09731, nghĩa là chiều sâu mòn của lớp phủ điện phân plasma thấp hơn 67,89%.

Như vậy, kết quả nghiên cứu cho thấy lớp phủ PEO có hệ số ma sát trung bình là 0,4069, cao hơn khoảng 29,2% so với lớp mạ crôm (0,3149). Điều này phản ánh tính chất bề mặt gồm xóp của lớp phủ PEO vốn có xu hướng tăng cường tương tác tiếp xúc khi trượt, dẫn đến ma sát lớn hơn. Tuy nhiên, trong các ứng dụng yêu cầu tính ổn định ma sát hoặc cần kiểm soát hệ số ma sát cao (ví dụ trong phanh, ly hợp...), đặc tính này có thể là một lợi thế.

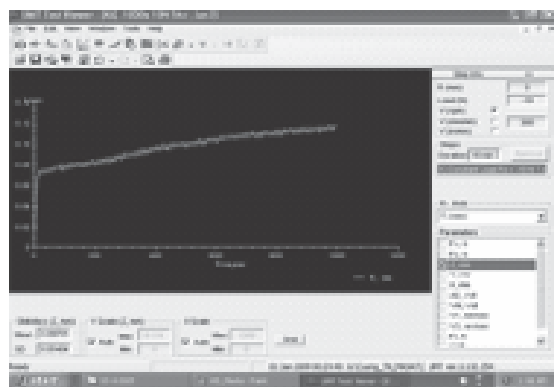
Về khả năng chống mài mòn, lớp phủ PEO thể hiện khả năng vượt trội với chiều sâu mòn sau 1000 giây làm việc chỉ 0,03124 mm, trong khi lớp mạ crôm là 0,09731 mm, tức PEO giảm mức mài mòn tới 67,89%. Sự khác biệt lớn này đến từ cấu trúc lớp phủ gồm oxit dạng α -Al₂O₃ có độ cứng cao, khả năng phân tán ứng suất tốt và chịu mài mòn tốt hơn so với lớp mạ



crôm kim loại đơn thuần. Ngoài ra, trong điều kiện ma sát trượt tuyến tính như chuẩn ASTM G133 sử dụng, sự kết dính chặt giữa lớp phủ PEO và nền cũng góp phần giảm hiện tượng bong tróc, tăng tuổi thọ lớp phủ. Lớp phủ PEO, mặc dù có hệ số ma sát lớn hơn, nhưng khả năng chống mài mòn lại vượt trội trong cùng điều kiện làm việc. Đây là minh chứng thực nghiệm cho tiềm năng ứng dụng của PEO trong các hệ thống cơ khí chịu tải trượt, nơi yêu cầu cao về độ bền và bảo vệ bề mặt.



a)



b)

Hình 5. Kết quả thí nghiệm mài mòn (a - Hệ số ma sát mẫu plasma; b - Hệ số ma sát mẫu mạ crôm)

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo này đã thực hiện nghiên cứu so sánh tính chất ma sát và khả năng chống mài mòn giữa lớp phủ oxit tạo ra bằng phương pháp oxy hóa điện phân plasma (PEO) và lớp

mạ crôm truyền thống trên nền thép. Các kết quả cho thấy lớp phủ PEO có hệ số ma sát cao hơn khoảng 29,2% so với lớp mạ crôm, phản ánh đặc điểm tiếp xúc của bề mặt oxit gốm. Khả năng chống mài mòn của lớp phủ PEO vượt trội, với chiều sâu mòn thấp hơn lớp mạ crôm tới 67,89% trong cùng một điều kiện thí nghiệm. Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng của lớp phủ PEO như một giải pháp thay thế thân thiện môi trường cho lớp mạ crôm trong các chi tiết máy cơ khí chịu tải trượt.

Nghiên cứu này cũng mở ra các hướng nghiên cứu tiếp theo về khả năng của lớp PEO trong các điều kiện tải trọng và môi trường khác, đồng thời kết hợp với mô phỏng số để dự đoán tuổi thọ lớp phủ nhằm nâng cao độ tin cậy trong ứng dụng thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm của Bộ môn Cơ học máy, Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự. Tác giả xin cảm ơn Học viện Kỹ thuật quân sự đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 05/6/2025

Ngày phản biện: 20/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Phan Văn Trường, Nguyễn Văn Thành, Đỗ Minh Hiếu, “Nghiên cứu chế tạo lớp phủ có độ cứng cao và chống ăn mòn lên hợp kim D16 bằng phương pháp oxy hóa điện phân plasma”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ nhiệt đới, Số 28, 12-2022.
- [2]. Sikdar et al., “Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process – Processing Properties, and Applications”. Nanomaterials, 2021.

- [3]. Kaseem & Dikici, “*Optimization of Surface Properties of Plasma Electrolytic Oxidation Coating by Organic Additives*”. Coatings, 2021.
- [4]. Aliofkhazraei et al., “*Review of PEO of Titanium Substrates: Mechanism, Properties, Applications and Limitations*”. Applied Surface Science Advances, 2021.
- [5]. Nominé, J. Martin, C. Noel, G. Henrion, T. Belmonte, I. Bardin, V. Kovalev, A. Rakoch, “*The Evidence of Cathodic Micro-discharges during Plasma Electrolytic Oxidation Process*”. Applied Physics Letters, American Institute of Physics, 2014, 104 (8), pp.081603.
- [6]. Aljohani et al., “*Impact of processing parameters in PEO on AZ91-Mg alloy*”. Engineering Reports, 2022.
- [7]. Lu et al., “*Effect of Graphene Nanoplatelets Content on the Mechanical and Wear Properties of AZ31 Alloy*”. Metals, 2020.
- [8]. Liu, Peng & Lang, “*Investigation of Friction and Wear Performance and Failure Mechanism of PEO Coating on TC4 Alloy*”. TRIBOLOGY, 2019.
- [9]. Azar et al., “*Low Friction Achieved on PEO-Coated TC4 Alloy in the Presence of PAO Base Oil Containing MoDTC*”. Lubricants, 2021.
- [10]. Li et al., “*Synergistic lubrication effect of OLC and MoDTC for reducing friction and wear of MAO ceramic coating on TC4 alloy*”. Int. J. Appl. Ceramic Technology, 2024.
- [11]. Ракоч А. Г., Дуб А. В., Гладкова А. А., “*Анодирование легких сплавов про различных электрических режимах*”. Плазменно – электролитическая нанотехнология, Старая Басманная, Москва, 2012, 496 с.
- [12]. ASTM G133-05, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear (2016).
- [13]. Zmitrowicz, A., “*Wear Patterns and Laws of Wear – A Review*”. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, pp. 219-253, 2006.

THIẾT KẾ CƠ CẤU TRUYỀN ĐỘNG VÂY DỰA TRÊN CƠ CẤU BỐN KHÂU KHÔNG GIAN

DESIGN OF A SPHERICAL FOUR-BAR MECHANISM FOR ROBOTIC FISH FINS

Nguyễn Văn Bình Dương^{1,2}, Phan Hoàng Long^{1,2,3}, Nguyễn Huy Hùng⁴, Dương Văn Tú^{1,2,3},
Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

*Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu thiết kế cơ cấu bốn khâu bản lề cầu ứng dụng trong chi vây robot cá mô phỏng sinh học. Cơ cấu được phân tích bằng phương pháp công suất để xác định tỷ số vận tốc và moment truyền động, từ đó đánh giá hiệu suất truyền lực. Mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số hình học và lợi thế cơ học được mô hình hóa bằng hồi quy bội bậc ba, tinh giản bằng thuật toán AIC. Kết quả mô hình cho thấy độ phù hợp cao ($R^2 > 0.96$), xác định vai trò then chốt của góc thiết kế trong việc tối ưu moment đầu vào. Cơ cấu sau đó được chế tạo và thử nghiệm trên mô hình robot cá, xác nhận tính khả thi và hiệu quả truyền động trong môi trường nước.

Từ khóa: Bản lề cầu; Robot cá; Truyền lực; Tối ưu hóa hình học.

ABSTRACT

This paper presents the design of a spherical four-bar mechanism for robotic fish fins. The mechanism is analyzed using power methods to evaluate velocity ratios and torque transmission efficiency. A nonlinear relationship between geometric parameters and mechanical advantage is modeled using cubic regression and simplified via AIC-based selection. The resulting model achieves high accuracy ($R^2 > 0.96$), confirming the critical role of angular parameters in torque optimization. The mechanism is fabricated and tested on a robotic fish prototype, demonstrating reliable underwater performance.

Keywords: Spherical hinge; Robotic fish; Torque transmission; Geometric optimization.

1. GIỚI THIỆU

Robot cá mô phỏng sinh học là hướng nghiên cứu thu hút trong lĩnh vực cơ điện tử và robot học mềm nhờ khả năng mô phỏng chuyển động hiệu quả, linh hoạt và thân thiện với môi trường nước [1], [2]. Đặc biệt, các hệ thống sử dụng cơ chế vây kiểu MPF (Median and/or Paired Fin propulsion), như ở loài *Gymnarchus niloticus*, cho phép robot di chuyển ổn định và điều hướng chính xác trong không gian hẹp [3].

Một thách thức quan trọng trong thiết kế robot cá là hệ thống truyền động từ động cơ đặt bên trong thân đến cụm chi vây bên ngoài – vốn dao động biên độ nhỏ và đòi hỏi độ chính xác cao. Các cơ cấu truyền thống như bánh răng, trục vít hoặc dây đai thường không phù hợp do độ ồn, ma sát lớn, khó bảo trì trong môi trường ẩm ướt và không dễ tích hợp vào cấu trúc nhỏ gọn.

Trong bối cảnh đó, cơ cấu bốn khâu bản lề cầu (spherical four-bar linkage) được xem là giải pháp truyền động khả thi nhờ cấu trúc gọn nhẹ, chỉ một bậc tự do, truyền chuyển động quay ổn định trong không gian ba chiều mà không cần các phần tử ăn khớp [4], [5]. Ngoài ra, cơ cấu này hoạt động mượt mà trong môi trường nước và dễ tích hợp trong robot có kích thước hạn chế. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào phân tích động học [6], [7], trong khi mối liên hệ định lượng giữa thông số hình học và hiệu suất truyền động (moment, tỉ số vận tốc, lợi thế cơ học) chưa được làm rõ một cách hệ thống.

Từ đó, nghiên cứu này hướng đến việc phân tích, mô hình hóa và tối ưu hóa cơ cấu bản lề cầu, tập trung vào mối quan hệ giữa các tham số hình học và moment truyền động. Mục tiêu là xác định vùng thiết kế tối ưu giúp giảm moment đầu vào, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng truyền tải, từ đó hỗ trợ ứng dụng hiệu quả

cơ cấu trong thiết kế robot cá thế hệ mới.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Động học cơ cấu

Cơ cấu bốn khâu bản lề cầu là một hệ thống chỉ có một bậc tự do, trong đó góc quay đầu vào α tại trục khớp A sẽ xác định duy nhất góc quay đầu ra β tại trục khớp D. Mối quan hệ hình học giữa α và β được xác định bởi phương trình Freudenstein dạng cầu:

$$\cos\phi = A\cos\alpha + B\cos\beta + C$$

Trong đó, các hệ số A, B, C là hàm của thông số hình học (các góc giữa trục khớp), được tính trước theo thiết kế.

Dựa trên phương trình này, ta có thể xác định vận tốc góc đầu ra từ vận tốc đầu vào bằng đạo hàm theo thời gian:

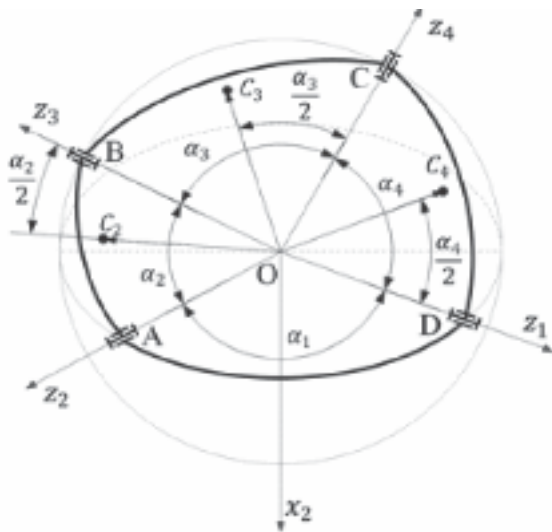
$$\omega_{out} = \frac{d\beta}{dt} = \frac{d\beta}{d\alpha} = \omega_{in}$$

Hệ số $d\beta/d\alpha$ chính là tỷ số truyền vận tốc tức thời, đóng vai trò như một Jacobian động học. Biểu thức này phản ánh rõ bản chất phi tuyến của cơ cấu: cùng một vận tốc đầu vào nhưng vận tốc đầu ra biến thiên mạnh theo vị trí cấu hình.

Tương tự, bằng đạo hàm bậc hai, ta cũng có thể xác định gia tốc góc đầu ra dựa vào gia tốc đầu vào và đạo hàm của tỷ số truyền. Tuy nhiên, trong phạm vi nghiên cứu này, trọng tâm được đặt vào vận tốc và moment - hai yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến truyền lực.

Những kết quả này là cơ sở để đánh giá hiệu suất truyền động của cơ cấu tại mỗi vị trí vận hành, và làm tiền đề cho việc xây dựng mô hình động lực học và tối ưu hóa thiết kế.





Hình 1. Sơ đồ nguyên lý cơ cấu bốn khâu bản lề không gian

2.2. Động lực học cơ cấu

Để mô tả moment truyền động, nghiên cứu sử dụng phương pháp công suất tức thời. Theo định lý bảo toàn công suất, moment đầu vào M_{in} cần thỏa mãn:

$$M_n \omega_{in} = M_{out} \omega_{out} + P_g$$

Với: M_{out} – Moment tải tại khâu ra; P_g – Công suất do trọng lượng các khâu sinh ra.

Sử dụng quan hệ vận tốc đã phân tích trước đó, moment đầu vào được suy ra theo:

$$M_{in} = M_{out} \frac{d\beta}{d\alpha} + M_g$$

Trong đó, phần tử $d\beta/d\alpha$ phản ánh rõ mức độ khuếch đại hoặc suy giảm moment giữa đầu vào và đầu ra tại từng cấu hình. Tại các vị trí gần “điểm chết” động học, tỷ số truyền tiệm cận 0 hoặc ∞ , khiến moment yêu cầu tăng vọt – đây là hiện tượng phi tuyến đặc trưng của cơ cấu bản lề cầu.

Ngoài ra, để đánh giá hiệu suất truyền moment tại mỗi cấu hình, nghiên cứu sử dụng đại lượng tỷ số truyền lực moment:

$$\eta = \frac{M_{in}}{M_{out}}$$

Giá trị η càng nhỏ thì hiệu suất truyền lực càng cao, tức moment đầu vào cần thiết càng thấp. Phân tích sự biến thiên của η trên toàn bộ không gian thiết kế là cơ sở để xây dựng mô hình tối ưu hóa sau này.

Dựa trên phân tích động lực học, moment đầu vào M_{in} phụ thuộc mạnh vào cấu hình hình học của cơ cấu – cụ thể là hai góc thiết kế chính α và β . Để khảo sát định lượng ảnh hưởng này, nghiên cứu tiến hành xây dựng tập dữ liệu mô phỏng, trong đó các giá trị moment được tính toán tương ứng với nhiều tổ hợp góc đầu vào-ra thuộc phạm vi thiết kế.

2.3. Mô hình hồi quy và tối ưu hóa

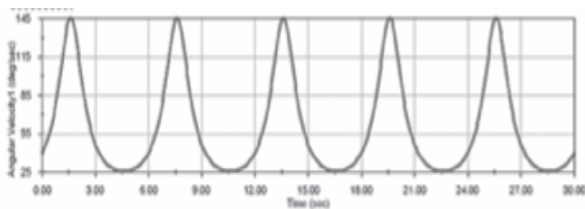
Từ tập dữ liệu thu được, nghiên cứu sử dụng hồi quy bội bậc ba (cubic multiple regression) để xây dựng mô hình phi tuyến mô tả mối quan hệ giữa các tham số hình học (biến đầu vào) và tỷ số truyền lực moment η (biến đầu ra). Mô hình ban đầu bao gồm các biến tuyến tính, bậc hai, bậc ba và các tương tác giữa α , β .

Để đảm bảo mô hình không quá phức tạp và tránh hiện tượng dư thừa tham số, thuật toán lựa chọn mô hình stepwise theo tiêu chí Akaike (AIC) được áp dụng. Nhờ đó, mô hình hồi quy cuối cùng chỉ giữ lại các biến có ảnh hưởng thống kê rõ rệt, đồng thời vẫn duy trì độ phù hợp cao ($R^2 > 0.96$).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô phỏng động lực học của cơ cấu

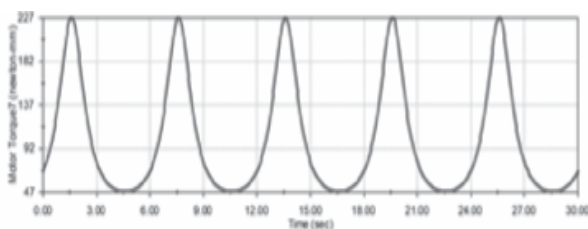
Dựa trên mô hình công suất đã xây dựng, nghiên cứu tiến hành mô phỏng quá trình truyền động của cơ cấu bốn khâu bản lề cầu với moment tải không đổi. Mô phỏng cho thấy vận tốc góc đầu ra biến thiên mạnh theo thời gian, dù vận tốc đầu vào giữ không đổi. Hiện tượng này phản ánh tính phi tuyến động học của cơ cấu do hệ số truyền $d\beta/d\alpha$ thay đổi liên tục theo cấu hình.



Hình 2. Vận tốc góc đầu ra theo thời gian

Hình 2 cho thấy vận tốc góc khâu ra dao động mạnh và không đều.

Tương ứng, moment đầu vào M_{in} cũng dao động theo chu kỳ chuyển động, với các pha cực đại khi cơ cấu tiệm cận vị trí “điểm chết” (Jacobian tiến về 0). Khi đó, hệ số truyền lực η tăng vọt, làm tăng đáng kể yêu cầu công suất đầu vào.



Hình 3. Moment đầu vào theo thời gian

Hình 3 cho thấy sự tăng vọt moment tại các pha không thuận lợi.

3.2. Khảo sát ảnh hưởng các thông số hình học

Để đánh giá ảnh hưởng của hình học đến hiệu suất, nghiên cứu khảo sát nhiều tổ hợp góc α và β , đồng thời tính toán giá trị η . Kết quả được tổng hợp trong bảng số liệu, cho thấy khi α giảm (góc khâu vào ngắn hơn), giá trị η giảm rõ rệt - tức cơ cấu yêu cầu moment đầu vào thấp hơn.

Bảng 1. Bảng giá trị về α_1 , α_2 và M_A

TT	α_1	α_2	M_A	TT	α_1	α_2	M_A
1	90	80	11.428	19	70	30	1.462
2	90	70	5.671	20	70	20	1.282
3	90	60	3.732	21	70	15	1.203
4	90	50	2.747	22	60	50	1.737
5	90	45	2.144	23	60	45	1.629
6	90	30	1.732	24	60	30	1.366
7	90	20	1.428	25	60	20	1.227
8	90	15	1.303	26	60	15	1.165
9	80	70	3.848	27	50	45	1.479
10	80	60	2.877	28	50	30	1.286
11	80	50	2.285	29	50	20	1.179
12	80	45	2.065	30	50	15	1.131
13	80	30	1.580	31	45	30	1.250
14	80	20	1.347	32	45	20	1.158
15	80	15	1.248	33	45	15	1.115
16	70	60	2.357	34	30	20	1.099
17	70	50	1.969	35	30	15	1.073
18	70	45	1.817				

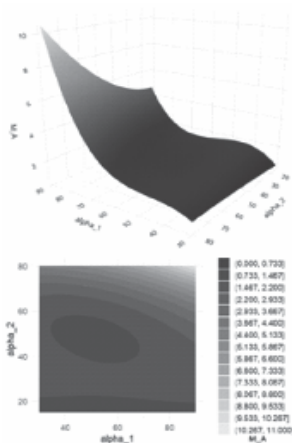
Bảng 1 cho thấy η có xu hướng giảm theo α .

Kết quả này là tiền đề để xây dựng mô hình hồi quy ở bước sau, đồng thời cung cấp cái nhìn ban đầu về vùng cấu hình hình học tối ưu – nơi hiệu suất truyền lực đạt cao nhất. 

3.3. Kết quả hồi quy và phân tích thống kê

Dựa trên dữ liệu mô phỏng thu được từ khảo sát các tổ hợp góc thiết kế α và β , nhóm nghiên cứu xây dựng mô hình hồi quy bội bậc ba nhằm mô tả mối quan hệ phi tuyến giữa hình học cơ cấu và hiệu suất truyền lực - được đại diện bởi hệ số truyền lực moment η .

Mô hình ban đầu bao gồm đầy đủ các thành phần: tuyến tính, bình phương, lập phương, cũng như các tương tác hai chiều giữa hai biến α và β . Để tránh dư thừa tham số và đảm bảo tính gọn nhẹ, thuật toán lựa chọn biến stepwise theo tiêu chí thông tin Akaike (AIC) được áp dụng. Kết quả là mô hình tối ưu giữ lại 6 biến quan trọng, trong đó các thành phần chứa α cho thấy ảnh hưởng vượt trội. Điều này cho thấy góc α (góc đầu vào) đóng vai trò quyết định đến moment truyền động, trong khi β có ảnh hưởng tương đối yếu hơn nếu xét riêng lẻ.



Hình 4. M_A và biểu đồ contour của mô hình

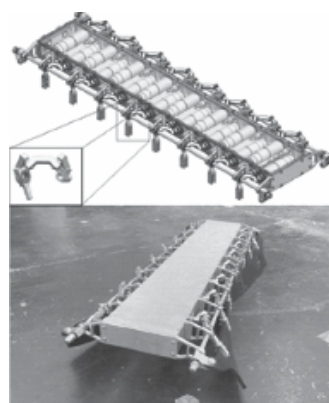
Biểu đồ contour thu được từ mô hình hồi quy thể hiện rõ một vùng thiết kế tối ưu, tại đó hệ số η đạt giá trị nhỏ nhất – tương ứng với hiệu suất truyền lực cao. Cụ thể, khi α nằm trong khoảng $45^\circ \div 60^\circ$, η giảm đáng kể bất kể β thay đổi, cho thấy tính ổn định của vùng thiết kế này.

Phân tích phần dư cho thấy các giả định của mô hình hồi quy được thỏa mãn: phần dư phân bố gần chuẩn (theo biểu đồ Q – Q), không xuất hiện phương sai thay đổi đáng kể ở các biên thiết kế, và không có điểm ngoại lệ ảnh hưởng mạnh (Cook's distance < 0.5). Những kết quả này khẳng định độ tin cậy của mô hình và khả năng áp dụng nó như một công cụ hỗ trợ thiết kế, cho phép dự đoán trước hiệu suất truyền động dựa trên các thông số hình học đầu vào.

4. THIẾT KẾ VÀ THỬ NGHIỆM

Dựa trên kết quả mô hình hồi quy và biểu đồ đánh giá hiệu suất, nghiên cứu lựa chọn một tập giá trị góc thiết kế nằm gần vùng tối ưu, cụ thể là $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 30^\circ$. Cặp góc này không đạt cực tiểu tuyệt đối của hệ số truyền lực η , nhưng đảm bảo cân bằng giữa hiệu suất và khả năng bố trí cơ khí thực tế, đặc biệt trong không gian hạn chế của robot cá.

Một mô hình CAD 3D của cơ cấu bốn khâu bản lề cầu được dựng để kiểm tra khả năng lắp ghép, bố trí động cơ và gắn kết cụm chi vây. Từ đó, nguyên mẫu được chế tạo bằng vật liệu nhựa cứng nhẹ, sử dụng trục xoay thép và gối đỡ ma sát thấp nhằm giảm tiêu hao cơ học trong điều kiện hoạt động thực.



Hình 5. Mô hình 4 khâu bản lề không gian và thực tế

Thử nghiệm sơ bộ trong môi trường nước cho thấy cơ cấu hoạt động ổn định, phản hồi nhanh và không có hiện tượng trễ hoặc kẹt. Chuyển động dao động của chi vây được tái hiện mượt mà, phù hợp với yêu cầu ứng dụng MPF. Moment đầu vào đo được phù hợp với giá trị dự báo từ mô hình hồi quy, xác nhận tính khả thi của phương pháp thiết kế tối ưu hóa dựa trên phân tích công suất và thống kê.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày một phương pháp tiếp cận toàn diện trong thiết kế và tối ưu hóa cơ cấu bốn khâu bản lề cầu, ứng dụng cho robot cá mô phỏng sinh học.

Thông qua phân tích động học, động lực học bằng phương pháp công suất và mô hình hóa hồi quy thống kê, nghiên cứu đã xác định rõ ảnh hưởng của các góc hình học đến hiệu suất truyền lực.

Mô hình hồi quy bội bậc ba đạt độ phù hợp cao ($R^2 > 0.96$), cho phép dự đoán hiệu quả hệ số truyền lực theo các tham số thiết kế. Kết quả cho thấy góc đầu vào α là yếu tố chi phối khả năng truyền moment, đồng thời giúp xác định vùng thiết kế tối ưu trong không gian hình học của cơ cấu.

Nguyên mẫu cơ cấu đã được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm thành công trên robot cá mô phỏng. Kết quả thực nghiệm phù hợp với mô phỏng, chứng minh tính khả thi và hiệu quả của phương pháp thiết kế đề xuất trong điều kiện ứng dụng thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong khuôn khổ đề tài

mã số ĐTĐL.CN-41/22. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **08/7/2025**

Ngày phản biện: **23/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. G. Li, G. Liu, D. Leng, X. Fang, G. Li, and W. Wang, "Underwater Undulating Propulsion Biomimetic Robots: A Review". Jul. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/biomimetics8030318.
- [2]. H. Zhou et al., "Bio-inspired Flow Sensing and Prediction for Fish-like Undulating Locomotion: A CFD-aided Approach". J. Bionic Eng., vol. 12, no. 3, pp. 406-417, Jul. 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60132-3.
- [3]. F. Liu, K. M. Lee, and C. J. Yang, "Hydrodynamics of an undulating fin for a wave-like locomotion system design". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 17, no. 3, pp. 554-562, 2012, doi: 10.1109/TMECH.2011.2107747.
- [4]. K. H. Shirazi, "Computer modelling and geometric construction for four-point synthesis of 4R spherical linkages". Appl Math Model, vol. 31, no. 9, pp. 1874-1888, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.apm.2006.06.013.
- [5]. J. Schuler, J. Ketchel, and P. Larochelle, "Computer-aided modeling and manufacturing of spherical Mechanisms via a novel Web tool". J. Comput Inf. Sci. Eng., vol. 7, no. 4, pp. 339-346, Dec. 2007, doi: 10.1115/1.2795307.
- [6]. G. Figliolini, C. Lanni, and R. Kaur, "Kinematic Synthesis of Spherical Four-bar Linkages for Five-Poses Rigid Body Guidance". In Mechanisms and Machine Science, Springer Science and Business Media B.V., 2019, pp. 639-648. doi: 10.1007/978-3-030-20131-9_64.
- [7]. A. Tang. Yang, "Static Force and Torque Analysis of Spherical Four-Bar Mechanisms", 1965. [Online] Available: <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- [8]. J. Angeles and S. Bai, Mathematical Engineering.

THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC CỤM MÀNG VÂY MỀM CHO ROBOT BƠI PHÒNG SINH HỌC SỬ DỤNG CHUYỂN ĐỘNG MPF

DESIGN AND DYNAMIC ANALYSIS OF A SOFT FIN MODULE FOR A BIO-INSPIRED SWIMMING ROBOT WITH MPF LOCOMOTION

Nguyễn Văn Bình Dương^{1,2}, Phan Hoàng Long^{1,2,3}, Nguyễn Huy Hùng⁴,
Dương Văn Tú^{1,2,3}, Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất một cụm vây mềm cho robot bơi phỏng sinh học sử dụng cơ chế vận động MPF. Mỗi chi vây được xác định cần ba bậc tự do để tái hiện chuyển động uốn sóng tự nhiên. Cụm vây được điều khiển bởi một trục cam duy nhất với 9 cặp cam lệch pha tạo sóng lan truyền. Hệ thống tích hợp cơ cấu điều chỉnh góc trung vị từ -90° đến $+90^\circ$, giúp điều hướng robot trong không gian 3D. Mô phỏng cho thấy moment truyền động trên trục cam dao động trong khoảng 1000-4200Nmm và moment xoay khung có thể đạt 57000Nmm. Thiết kế này giúp giảm số nguồn dẫn động, đồng bộ hóa chuyển động và phù hợp với các hệ robot bơi nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng.

Từ khóa: Robot bơi phỏng sinh học; Màng vây mềm; Chuyển động MPF.

ABSTRACT

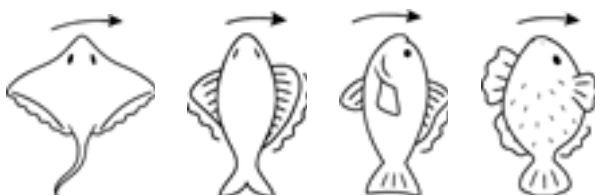
This study proposes a soft fin module for a bio-inspired swimming robot using MPF (Median and Paired Fin) locomotion. Each fin ray is designed with three degrees of freedom to replicate natural wave-like motion. A single camshaft drives 9 out-of-phase cams to generate traveling waves. The system also includes a mechanism to adjust the median plane angle from -90° to $+90^\circ$ for 3D orientation. Simulations show camshaft torque varies from 1000 to 4200 N•mm, and torque for median angle control reaches up to 57000 N•mm. The design reduces actuators, ensures smooth coordination, and suits compact, energy-efficient robotic systems.

Keywords: Bio-inspired swimming robot; Soft fin membrane; MPF locomotion.

1. GIỚI THIỆU

Trong các ứng dụng khảo sát, quan trắc và bảo trì môi trường biển, robot bơi ngày càng được quan tâm. Tuy nhiên, các hệ truyền động sử dụng chân vịt truyền thống thường gây nhiễu dòng, hiệu suất thấp khi di chuyển chậm, và không phù hợp với môi trường chật hẹp hoặc cần độ yên tĩnh cao [1]. Do đó, robot bơi phỏng sinh học – mô phỏng cơ chế vận động của cá – đang nổi lên như một hướng tiếp cận hiệu quả hơn [2].

Trong tự nhiên, cá thường bơi theo hai cơ chế chính: BCF (Body-Caudal Fin) và MPF (Median and Paired Fin) [3]. Cơ chế MPF đặc biệt phù hợp cho robot hoạt động chậm, ổn định và định hướng chính xác, nhờ sử dụng chuyển động mềm dẻo của các vây ngực, vây lưng và hậu môn. Dựa trên đặc điểm đó, nhiều thiết kế robot MPF đã được phát triển, như: kiểu rajiform ở cá đuối, balistiform ở triggerfish, labriform ở cá thia, và diodontiform ở cá nóc – mỗi kiểu có đặc trưng truyền động riêng (Hình 1).



rajiform balistiform labriform diodontiform
Hình 1. Phân loại chuyển động MPF

Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu hiện tại hoặc sử dụng nhiều động cơ độc lập gây phức tạp, hoặc thiếu sự đồng bộ trong mô hình hóa động học của màng vây. Để giải quyết điều này, nghiên cứu này hướng tới phát triển một cụm màng vây mềm sử dụng cơ cấu truyền động cam-con lăn duy nhất, có thể tạo sóng lan truyền và điều khiển hướng chuyển động 3D, từ đó tạo nền tảng cho các robot bơi phỏng sinh

học nhỏ gọn, tiết kiệm năng lượng và hiệu quả cao.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHÂN TÍCH MÔ HÌNH

2.1. Mô hình hóa màng vây liên tục

Để mô phỏng chuyển động uốn sóng của cá theo cơ chế MPF, nghiên cứu xây dựng mô hình toán cho màng vây liên tục dựa trên cơ sở rời rạc hóa thành các tia vây (fin rays). Mỗi tia vây đóng vai trò là một vector dao động trong mặt phẳng, kết nối biên trong và biên ngoài của màng vây đàn hồi.

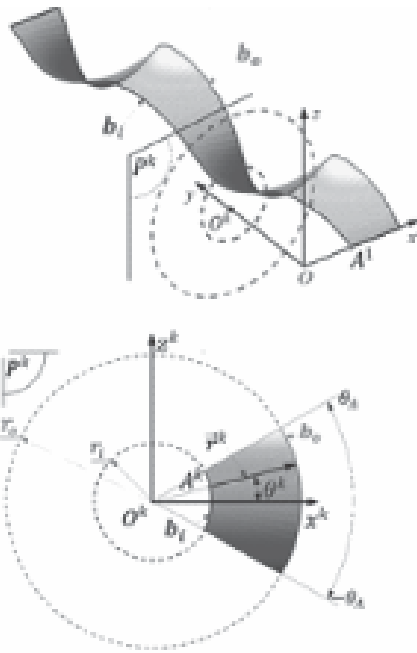
- Bậc tự do 1: Mô tả sự dao động góc của từng chi vây (tia vây) theo dạng sóng lan truyền. Màng vây được rời rạc hóa thành n chi vây đều nhau, mỗi chi vây có góc dao động được định nghĩa bởi:

$$\theta_k(t) = A \sin \left(2\pi f t + \frac{2\pi N k}{n} \right) \quad (1)$$

Với: A – Biên độ dao động; f – Tần số sóng; n – Số bước sóng trên chiều dài vây; N – Số tia vây; k – Chỉ số tia vây, $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Để đảm bảo dao động nhịp nhàng và không làm rách màng vây, các tia cần dao động đồng bộ theo biên dạng cong, tạo ra sự lan truyền sóng mượt mà từ đầu đến cuối vây. Ngoài góc dao động, mỗi tia vây cần thêm hai bậc tự do nữa.





Hình 2. Mô hình rời rạc hóa màng vây thành các tia vây dao động có định hướng

- Bậc tự do 2: Điều chỉnh hướng tiếp tuyến tại điểm gốc tia vây để phù hợp với độ cong tức thời của màng. Góc này được xác định bởi góc giữa vector tiếp tuyến tại biên trong và mặt phẳng chuẩn (Oxy):

$$\gamma^k(t) = \arccos\left(\frac{\vec{T}_k \vec{n}}{\|\vec{T}_k\| \|\vec{n}\|}\right) \quad (2)$$

- Bậc tự do 3: Đảm bảo độ dài cong giữa các tia vây không thay đổi theo thời gian (duy trì dạng sóng ổn định), được mô tả bằng ràng buộc đạo hàm toàn phần:

$$\frac{d}{dt} \int_0^k \frac{\partial \vec{r}(n, t)}{\partial n} dn = 0 \quad (3)$$

Từ ba phương trình (1)-(3), ta xác lập rằng mỗi tia vây cần 3 bậc tự do để tái hiện chuyển động sinh học chính xác của màng vây mềm: dao động, định hướng tiếp tuyến, và duy trì độ cong lan truyền.

Mô hình này là nền tảng để xác định yêu cầu thiết kế cho cụm chi vây và cơ cấu truyền động tương ứng trình bày ở các mục sau.

2.2. Mô hình động học cụm chi vây

* Cấu trúc khung đỡ và định nghĩa vector chi vây

Trong cụm màng vây, mỗi chi vây (fin ray) được định nghĩa là một vector $\vec{r}^k$ nối từ điểm gốc trên biên trong b_i đến điểm ngọn trên biên ngoài b_o của màng vây (xem Hình 2). Mỗi vector này nằm trên mặt phẳng riêng (x^k, z^k) ứng với tia vây thứ k , có gốc tại O^k và tạo với trục tham chiếu một góc dao động tức thời θ_k .

Chiều dài vector $\vec{r}^k$ là không đổi, bằng hiệu số bán kính giữa hai đường tròn cơ sở:

$$\|\vec{r}^k\| = r_o - r_i$$

Hệ thống khung đỡ được tổ chức sao cho các tia vây được bố trí đều theo một góc tổng cộng θ_A , với trục Oy làm tâm xoay chính, tạo nên dạng hình quạt trải đều theo mặt phẳng Oxz.

* Mối quan hệ giữa dao động và cấu trúc hình học

Để đảm bảo chuyển động liên tục và đồng bộ của màng vây, các tia vây cần dao động theo một biên độ và pha nhất định, như đã mô tả trong phương trình (1). Góc θ_k điều khiển hướng lắc của tia vây thứ k , đóng vai trò là bậc tự do đầu tiên trong mô hình.

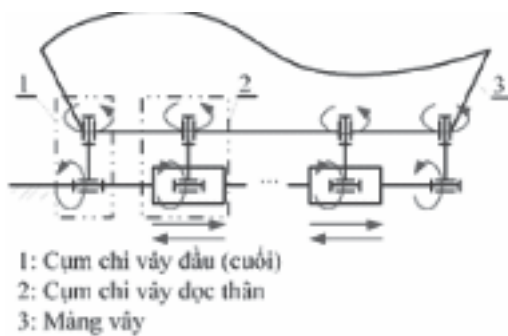
Đồng thời, sự thay đổi vector tiếp tuyến tại điểm gốc A^k cho biết mức độ cong cục bộ của màng vây - thể hiện bậc tự do thứ hai (góc tiếp tuyến ϕ_k). Bậc tự do thứ ba được đảm bảo

bởi điều kiện giữ nguyên độ cong tổng thể giữa các tia vây – tức là các tia không được làm rách, căng hoặc trùng màng vây – như đã trình bày trong phương trình (3).

Như vậy, mỗi cụm chi vây hoạt động vừa đảm bảo cấu trúc hình học ổn định, vừa tái hiện được dạng sóng uốn lan truyền dọc theo chiều dài màng, đóng vai trò thiết yếu trong hiệu quả đẩy của robot bơi.

3. THIẾT KẾ CƠ CẤU TRUYỀN ĐỘNG CAM – CON LĂN

3.1. Nguyên lý hoạt động



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý cụm chi vây với 3 bậc tự do điều khiển

Để tạo dao động tuần hoàn cho mỗi tia vây, nghiên cứu đề xuất sử dụng cơ cấu cam - con lăn - cần lắc, trong đó một cam đĩa quay đều tác động lên con lăn gắn vào đầu cần lắc, tạo ra chuyển động góc dao động θ_k của chi vây. Để đảm bảo sự tiếp xúc liên tục trong suốt chu kỳ hoạt động - đặc biệt ở các pha hồi chuyển - cơ cấu sử dụng cặp cam liên hợp (conjugate cams). Hai cam này được thiết kế có biên dạng đối xứng và lệch pha, giúp giữ con lăn luôn tiếp xúc mà không cần lò xo hay ép cơ khí, từ đó giảm rung động và lực phản hồi không mong muốn.

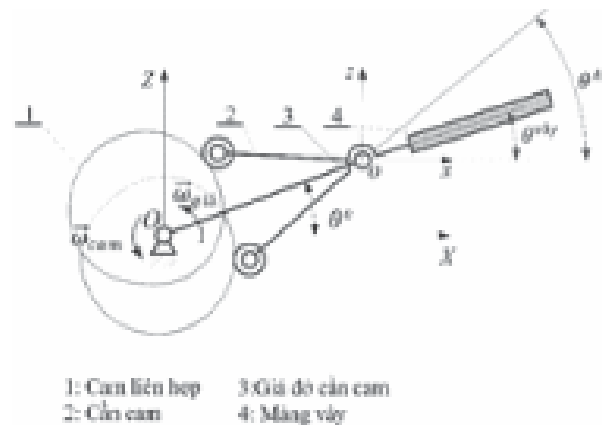
Trong thiết kế, đường biên cam được

xây dựng dựa trên hàm điều khiển dạng harmonic, vì loại này đảm bảo gia tốc và vận tốc biến thiên liên tục, giúp hệ thống vận hành trơn tru trong môi trường nước. Biểu thức dao động góc của cần lắc có dạng:

$$\theta(t) = \frac{\theta_{max}}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right) \quad (4)$$

Với: θ_{max} – Biên độ dao động cực đại;
T – Chu kỳ chuyển động.

3.2. Mô hình động lực học



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý hệ cam-con lăn-cần lắc 2 bậc tự do

Cơ cấu cam-cần-con lăn được mô hình hóa động lực học dựa trên định luật II Newton cho chuyển động quay. Gọi J_c , J_r lần lượt là mô men quán tính của cam và cần lắc, τ_c , τ_r là moment tác động tương ứng, ta có:

$$J_c \ddot{\theta}_c = \tau_{motor} - F_t R \quad (5)$$

$$J_r \ddot{\theta}_r = F_t l_r \quad (6)$$

Với: F_t – Lực tiếp tuyến giữa cam, con lăn; R – Bán kính tác dụng lực trên cam; l_r – Khoảng cách từ trục quay đến điểm tiếp xúc trên cần.



Cam đóng vai trò truyền động chính, tạo ra lực F_t làm cần lắc dao động và dẫn động chi vây. Khi có nhiều cụm chi vây (ví dụ 9 cụm), các cam sẽ được đặt lệch pha trên cùng một trục cam trung tâm, tạo ra dạng sóng lan truyền dọc theo chiều dài màng vây.

3.3. Cơ cấu điều chỉnh góc trung vị

Ngoài chuyển động dao động, nghiên cứu còn tích hợp khung quay trung vị – cho phép toàn bộ cụm màng vây xoay quanh trục O_y một góc $\theta_m \in [-90, +90]$. Việc điều chỉnh góc này mô phỏng chuyển động pitch/yaw của cá, cho phép robot định hướng không gian 3D. Việc thay đổi θ_m sẽ làm thay đổi mặt phẳng dao động của tất cả chi vây, ảnh hưởng trực tiếp đến hướng đẩy của robot.

4. THIẾT KẾ MODULE MÀNG VÂY MPF

4.1. Cấu trúc tổng thể

Module màng vây MPF được thiết kế gồm ba thành phần chính:

- Cụm chi vây (fin rays): Gồm nhiều tia vây mềm bố trí dọc theo chiều dài màng vây, mỗi tia được dẫn động bằng một cơ cấu cam-con lăn-cần lắc riêng biệt.
- Trục cam trung tâm: Mang nhiều cặp cam liên hợp, mỗi cặp lệch pha với nhau để tạo dạng sóng lan truyền.
- Khung quay trung vị: Giá đỡ có khả năng xoay toàn bộ cụm chi vây quanh trục O_y để thay đổi hướng đẩy của robot trong không gian 3D.

4.2. Tạo chuyển động sóng lan truyền

Để mô phỏng chuyển động uốn sóng của cá, các cam trên trục được bố trí lệch pha

đều nhau. Ví dụ, với 9 chi vây, độ lệch pha giữa hai cam liên tiếp là:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n}{N} \quad (7)$$

Với: n – Số bước sóng cần tái hiện trên chiều dài màng vây; N – Số lượng chi vây.

Việc phân pha chính xác này đảm bảo sóng lan truyền liên tục từ đầu đến cuối màng vây, tăng hiệu quả đẩy và tính ổn định của robot khi bơi.

4.3. Mô hình 3D và bố trí thực tế

Mô hình 3D của module được xây dựng trên phần mềm CAD (ví dụ SolidWorks), với cụm chi vây lắp vào trục cam thông qua cơ cấu cần lắc. Các khung đỡ và trục quay được bố trí sao cho:

- Đảm bảo góc trung vị tùy biến ($\pm 90^\circ$);
- Giảm không gian lắp đặt nhờ cơ cấu đồng trục;
- Đồng bộ hóa chuyển động giữa các chi vây nhờ truyền động cơ học tập trung;
- Toàn bộ module có thể được tích hợp vào thân robot bơi và điều khiển bởi một hoặc hai động cơ trung tâm, tùy theo cấu hình đối xứng trái-phải.

4.4. Ưu điểm thiết kế

- Tiết kiệm năng lượng: Chỉ cần 1 nguồn truyền động cho nhiều chi vây;
- Dễ điều khiển: Biên độ và pha sóng được xác định cơ học, không cần điều khiển điện tử riêng cho từng tia vây;
- Khả năng mở rộng: Có thể tăng số chi vây để mô phỏng các kiểu bơi khác nhau (rajiform, balistiform, v.v.);
- Tính module cao: Dễ chế tạo, lắp ráp và thay thế từng cụm chi vây.

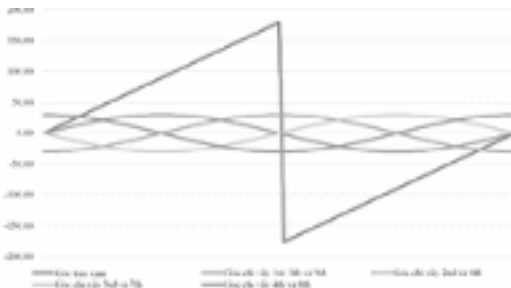
5. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

5.1. Mô phỏng dao động chi vây

Mô hình mô phỏng được thiết lập để đánh giá chuyển động của các chi vây trong module khi trục cam quay đều ở tốc độ 60 vòng/phút. Với 9 chi vây bố trí dọc theo màng vây và có cam lệch pha, kết quả cho thấy:

Các chi vây dao động đối xứng theo biên độ khoảng $\pm 30^\circ$;

- Chu kỳ dao động của từng chi vây là đồng bộ theo thiết kế cam harmonic;
- Pha dao động giữa các chi vây tạo thành sóng lan truyền đều từ đầu đến cuối màng vây.



Hình 5. Quan hệ giữa góc quay trục cam và góc dao động chi vây

Điều này chứng minh hiệu quả của phương pháp truyền động cam-con lăn trong việc mô phỏng chuyển động MPF dạng sóng tự nhiên.

5.2. Moment tác động lên trục cam

Moment cần thiết để duy trì quay trục cam được tính toán từ mô hình động lực học. Với mỗi chi vây chịu tải trọng 60N tại khoảng cách 70mm từ trục xoay, tổng moment biến thiên tuần hoàn với biên độ dao động $1000 \div 4200\text{Nmm}$.

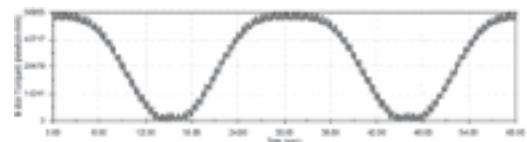
Moment đạt đỉnh tại các thời điểm nhiều chi vây đồng thời đi qua pha đảo chiều. Chu kỳ dao động moment cũng trùng với chu kỳ quay của trục cam. Kết quả này cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, không xuất hiện quá tải đột ngột, và hoàn toàn có thể dẫn động bởi một động cơ công suất vừa phải.

5.3. Moment điều chỉnh góc trung vị

Việc xoay khung trung vị trong khoảng $\pm 90^\circ$ được mô phỏng bằng hàm sin để đại diện cho thay đổi tư thế của robot. Khi tắt cả các chi vây đang dao động và mang tải, moment cần để quay khung giá trị lớn đáng kể $\sim 57000\text{Nmm}$.

Nguyên nhân là do quán tính tổng hợp của các cụm cam – cần – chi vây, đặc biệt ở vị trí xa tâm xoay. Biểu đồ moment theo thời gian cho thấy dao động lớn và có biên độ siêu cao tần – hệ quả của hiện tượng cộng hưởng pha giữa các chi vây.

Kết quả này chỉ ra rằng: Hệ truyền động góc trung vị cần một động cơ mạnh độc lập, đồng thời cần kiểm soát tốc độ thay đổi góc để tránh vượt quá ngưỡng tải trọng cơ học cho phép.



Hình 6. Moment cần thiết để thay đổi góc trung vị trong chu kỳ hình sin

5.4. Mô hình 3D tổng thể robot

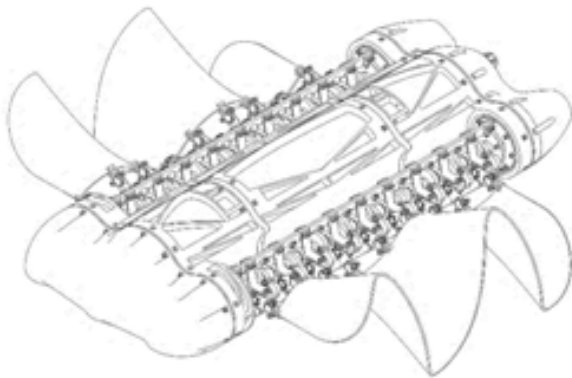
Toàn bộ module màng vây được tích hợp thành hai dây đối xứng hai bên thân robot (trái và phải), kết nối với trục cam thông qua bánh răng hoặc dây đai. Hệ thống có thể vận hành bằng:



- Một động cơ trung tâm cho cả hai cụm, hoặc:

- Hai động cơ riêng biệt nếu muốn điều khiển hướng độc lập từng bên.

Mô hình CAD cho thấy cấu trúc nhỏ gọn, dễ lắp ráp, và tiềm năng tích hợp với vỏ robot thực tế.



Hình 7. Mô hình 3D robot bơi tích hợp hai cụm màng vây hai bên thân

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất phương pháp thiết kế cụm màng vây mềm cho robot bơi MPF, dựa trên mô hình hóa liên tục và rời rạc. Mỗi tia vây được xác định cần 3 bậc tự do để tái hiện chính xác chuyển động sóng mềm dẻo. Hệ truyền động sử dụng cơ cấu cam-con lăn liên hợp để điều khiển đồng bộ nhiều chi vây bằng một trục cam duy nhất, kết hợp với khung quay trung vị giúp định hướng 3D.

Mô phỏng cho thấy hệ thống vận hành ổn định với moment trục cam 1000-4200 N•mm, và moment xoay trung vị lên tới 57000 N•mm. Thiết kế CAD hoàn chỉnh sẵn sàng chế tạo, phù hợp với các robot bơi nhỏ gọn hoạt động trong môi trường nước thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong khuôn khổ đề tài mã số ĐTĐL.CN-41/22. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/7/2025

Ngày phản biện: 23/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. G. Li, G. Liu, D. Leng, X. Fang, G. Li, and W. Wang, "Underwater Undulating Propulsion Biomimetic Robots: A Review". Jul. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/biomimetics8030318.
- [2]. M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and J. B. C. Davies, "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion". IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 24, no. 2, pp. 237–252, Apr. 1999, doi: 10.1109/48.757275.
- [3]. H. Zhou et al., "Bio-inspired Flow Sensing and Prediction for Fish-like Undulating Locomotion: A CFD-aided Approach". J Bionic Eng, vol. 12, no. 3, pp. 406-417, Jul. 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60132-3.
- [4]. CN213921435U (zh), 2021-08-10, Chi et al. (2022), "Snapping for high-speed and high-efficient, butterfly swimming-like soft flapping-wing robot".
- [5]. CN113320665A, BEIHANG UNIV, "Long-fin fluctuation propulsion bionic underwater robot".
- [6]. CN113696685B, Xian Jiaotong University, "Arrangement of propulsion or steering means on amphibious vehicles".
- [7]. Benjamin Pietro Filardo, "Apparatuses, Methods And Systems For Harnessing The Energy Of Fluid Flow To Generate Electricity Or Pump Fluid". United States Patent Application Publication, 2019.

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÁY CUỘN LỤC BÌNH MCLB-2

DESIGN AND FABRICATION OF THE MCLB-2 WATER HYACINTH BALING MACHINE

Nguyễn Công Nguyên¹, Lê Thanh Sơn⁴, Phan Hoàng Long^{1, 2, 3},
Ngô Nguyên Hồng⁵, Nguyễn Tấn Tiến^{1, 2, 3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Công ty Cổ phần Cơ khí Chế tạo máy Long An

⁵Công ty TNHH MTV Đóng xà lan Nguyên Hồng

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Lục bình là loài thực vật phát triển nhanh, gây tắc nghẽn giao thông thủy và ảnh hưởng đến môi trường tại các tuyến kênh rạch. Tiếp nối thành công của MCLB-01, nghiên cứu này giới thiệu thiết kế và chế tạo phiên bản cải tiến – máy cuộn lục bình MCLB-02 – với mục tiêu nâng cao năng suất, tối ưu vận hành và tăng độ linh hoạt ứng dụng. MCLB-02 vẫn giữ nguyên lý bán tự động với ba mô-đun chính, nhưng được cải tiến về cơ khí, truyền động và tích hợp cảm biến điều khiển. Thiết kế mới giúp giảm tiêu hao nhiên liệu, tăng độ ổn định và chất lượng sản phẩm. Thử nghiệm tại xã Vĩnh Hưng (Tây Ninh) cho năng suất 50-70 cuộn/giờ, tiêu hao 11,8 lít nhiên liệu/giờ, sản phẩm đạt độ nén tốt hơn MCLB-01. Kết quả cho thấy MCLB-02 là giải pháp hiệu quả trong xử lý và tận dụng lục bình vùng Đồng bằng sông Cửu Long.

Từ khóa: Lục bình; Máy cuộn lục bình; Xử lý sinh khối thủy sinh; Tây Ninh.

ABSTRACT

Water hyacinth is a fast-growing plant that clogs waterways and harms ecosystems in canal regions. Building on the success of the MCLB-01, this study presents the design and fabrication of the improved MCLB-02 baling machine, aimed at enhancing productivity, operational efficiency, and application flexibility. MCLB-02 retains a semi-automatic system with three main modules, but features upgrades in mechanical structure, drive system, and integrated sensors for precise control. The optimized design reduces fuel consumption and improves stability. Field tests in Vinh Hung commune (Tay Ninh) showed a productivity of 50-70 bales/hour, fuel use of 11.8 liters/hour, and better compression quality than MCLB-01. The MCLB-02 is a practical solution for mechanized hyacinth handling in the Mekong Delta.

Keywords: Water hyacinth; Baling machine; Aquatic biomass handling; Tay Ninh.



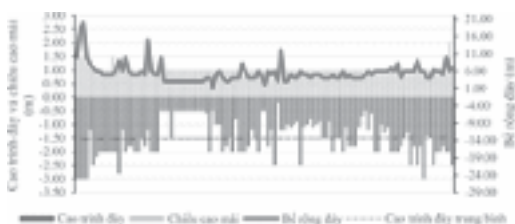
1. TỔNG QUAN

Tây Ninh là tỉnh có hệ thống kênh rạch dày đặc, tạo điều kiện cho lục bình phát triển mạnh, đặc biệt tại khu vực xã Vĩnh Hưng. Lục bình phát tán từ thượng nguồn (Campuchia) theo dòng nước về, tích tụ tại các đoạn nước chảy chậm, hình thành các mảng dày đặc gây cản trở giao thông thủy, suy giảm chất lượng nước và ảnh hưởng đến môi trường sinh thái cũng như an ninh – quốc phòng vùng biên giới.



Hình 1. Hình ảnh khảo nghiệm thực tế tại các đoạn kênh, rạch tại xã Vĩnh Hưng

Tình trạng lục bình bùng phát vào mùa mưa, kết hợp với ảnh hưởng của biến đổi khí hậu và hạn hán, đã khiến mức độ ô nhiễm và ách tắc dòng chảy ngày càng nghiêm trọng. Điều này đặt ra nhu cầu cấp thiết về các giải pháp xử lý hiệu quả, cơ giới hóa và thích ứng với điều kiện thực tế tại địa phương.



Hình 2. Thông số kỹ thuật các đoạn kênh khảo sát tại xã Vĩnh Hưng, tỉnh Tây Ninh

Nghiên cứu này kế thừa và phát triển

thiết bị MCLB-01, tập trung thiết kế, chế tạo và thử nghiệm phiên bản cải tiến MCLB-02 với mục tiêu nâng cao hiệu quả thu gom, đóng cuộn lục bình, đồng thời đảm bảo khả năng ứng dụng linh hoạt trong điều kiện địa hình kênh rạch miền Tây Nam Bộ.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

* Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng là cây lục bình *Eichhornia crassipes* – loài thực vật nổi tự do, có đặc tính sinh trưởng mạnh và gây xâm lấn. Các thông số cơ lý của lục bình như độ ẩm, khối lượng, độ xốp, hệ số ma sát... được khảo sát để làm cơ sở thiết kế thiết bị.

* Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng phương pháp thực nghiệm kết hợp mô phỏng kỹ thuật, gồm các bước:

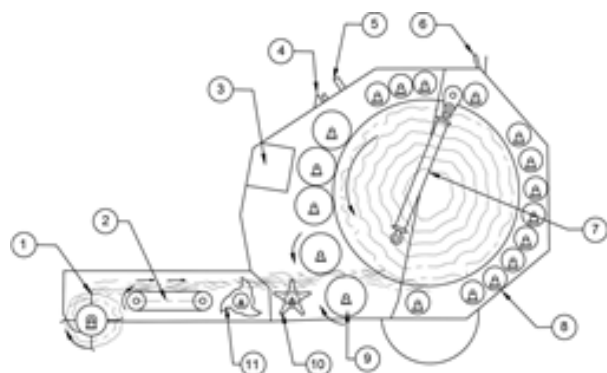
- Khảo sát thực tế: Thu thập dữ liệu về hiện trạng lục bình, điều kiện địa hình và đặc tính sinh khối tại kênh rạch vùng Tây Ninh.
- Thiết kế kỹ thuật: Dựa trên đặc tính cơ lý của lục bình, nhóm nghiên cứu xây dựng bản vẽ, lựa chọn kết cấu và thông số kỹ thuật phù hợp cho từng mô-đun (cấp liệu, cuộn, tháo kiện).
- Chế tạo thiết bị: Gia công và lắp ráp máy cuộn lục bình MCLB-2 tại xưởng, tích hợp các cụm cơ khí và hệ thống điều khiển.
- Thử nghiệm hiện trường: Vận hành thiết bị tại xã Vĩnh Hưng, đo lường các chỉ tiêu gồm năng suất cuộn, mức tiêu hao nhiên liệu, độ ổn định và chất lượng cuộn.
- Phân tích - đánh giá: So sánh kết quả thực nghiệm với các giá trị thiết kế để kiểm tra

độ tin cậy và khả năng ứng dụng thực tế của thiết bị.

* Mô hình thực hiện

Nghiên cứu được triển khai theo mô hình thực nghiệm, trong đó nguyên mẫu máy cuộn lục bình MCLB-2 được chế tạo và vận hành thử nghiệm trực tiếp tại kênh rạch xã Vĩnh Hưng (Tây Ninh). Dữ liệu thực địa về hiệu suất, độ ổn định và chất lượng sản phẩm được thu thập để đánh giá khả năng ứng dụng. Thiết bị được tích hợp lên sà lan nhằm nâng cao tính cơ động và hiệu quả xử lý lục bình trên diện rộng.

3. THIẾT KẾ



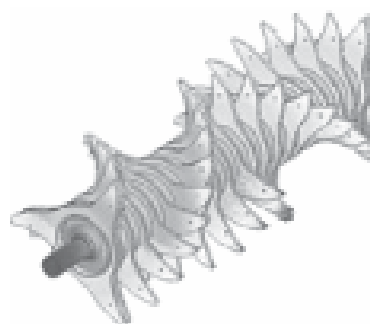
Hình 3. Nguyên lý máy cuộn lục bình thiết kế:

1. Trục cấp liệu sơ cấp; 2. Băng tải ép; 3. Cuộn dây; 4. Cơ cấu cấp dây; 5. Chỉ kế kích thước cuộn;
6. Chỉ kế cửa tháo liệu; 7. Xylanh tháo liệu;
8. Con lăn tạo hình; 9. Con lăn định hướng;
10. Trục cấp liệu; 11. Trục cấp liệu thứ cấp

Sơ đồ nguyên lý của máy cuộn lục bình MCLB-2 (Hình 3) gồm ba mô-đun bán tự động, phối hợp liên hoàn:

- Mô-đun cấp liệu: Mô-đun này chịu trách nhiệm tiếp nhận và đưa lục bình vào hệ thống cuộn. Cấu trúc gồm hai trục cấp liệu: sơ cấp và thứ cấp, phối hợp với băng tải ép có các thanh gạt dạng U nhằm tăng độ bám và ổn định

dòng vật liệu. Trục sơ cấp có cơ chế xoay để kéo vật liệu vào, trong khi trục thứ cấp đảm bảo phân phối đồng đều trước khi chuyển sang khoang cuộn. Cảm biến nhiệt và tải có thể được tích hợp để theo dõi dòng vật liệu và cảnh báo khi tắc nghẽn. Hệ thống truyền động của mô-đun sử dụng động cơ thủy lực có kiểm soát tốc độ, giúp điều chỉnh linh hoạt theo lưu lượng lục bình. Sử dụng trục cấp liệu sơ cấp và thứ cấp để tiếp nhận và dẫn lục bình vào hệ thống. Băng tải ép kết hợp các thanh gạt tăng độ bám, vừa có chức năng ép sơ bộ vừa phân bố vật liệu đồng đều.

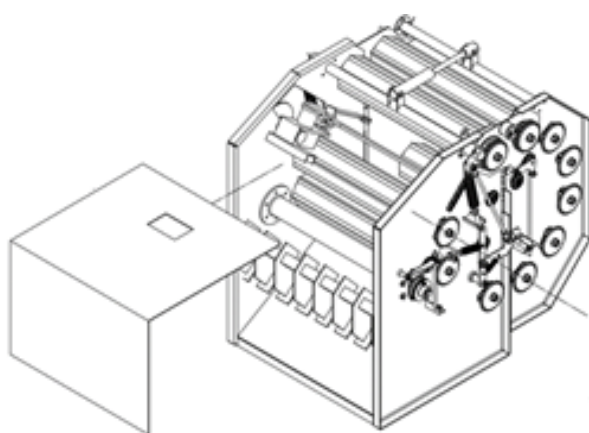


Hình 4. Trục cấp liệu thiết kế

- Mô-đun cuộn: Đây là trung tâm của quá trình tạo hình sản phẩm. Sau khi lục bình được đưa vào khoang cuộn, các trục cuộn được bố trí quay đồng tâm tạo chuyển động xoắn và lực ép theo chiều tiếp tuyến, giúp vật liệu được nén chặt thành bánh hình trụ. Cơ cấu cuộn được thiết kế để duy trì áp lực ổn định nhờ sự kết hợp giữa các con lăn hướng dòng và trục ép chính. Cảm biến kích thước được bố trí tại khoang nhằm kiểm soát đường kính cuộn, từ đó tự động điều khiển thời điểm kết thúc chu trình cuộn và chuyển sang bước tháo kiện. Hệ thống truyền động thủy lực giúp duy trì mô-men xoắn ổn định trong suốt quá trình. Lục bình được đưa vào khoang cuộn, nơi các trục cuộn quay đồng tâm tạo lực ép và chuyển động xoắn, hình thành bánh lục bình có mật độ cao. Cảm biến kích thước hỗ trợ kiểm soát độ nén và chu kỳ cuộn. 



a. Quá trình cuộn lực bình trong khoang cuộn

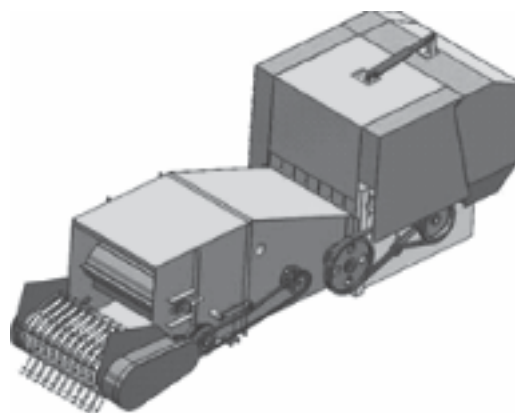


b. Khoang cuộn đóng bánh lực bình
Hình 5. Sơ đồ quá trình cuộn lực bình trong khoang cuộn

- Mô-đun tháo kiện: Mô-đun này đảm nhiệm công đoạn cuối cùng trong chu trình tạo cuộn. Khi cảm biến xác nhận cuộn đạt kích thước tiêu chuẩn, hệ thống điều khiển kích hoạt xy-lanh thủy lực mở cửa khoang cuộn và đẩy cuộn ra ngoài. Một cơ cấu buộc dây tự động được đồng bộ hóa để giữ định hình sản phẩm ngay khi ra khỏi buồng cuộn. Thiết kế này giúp đảm bảo chu trình tháo diễn ra nhanh chóng, liên tục và an toàn, đồng thời tạo điều kiện cho quy trình tái cuộn liền mạch. Mô-đun được tối ưu để vận hành ổn định ngay cả trong điều kiện dòng chảy trên sông và môi trường ẩm ướt. Sau khi đạt đủ kích thước, cửa tháo được kích

hoạt bằng xy-lanh thủy lực, cuộn được đẩy ra và buộc dây bằng cơ cấu tự động. Thiết kế cho phép tháo nhanh và liên tục, phù hợp vận hành trên sông.

Máy cuộn lực bình thiết kế cho ở Hình 6.



Hình 6. Máy cuộn lực bình thiết kế

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thiết bị được chế tạo và lắp đặt trên sà lan để vận hành thực nghiệm tại xã Vĩnh Hưng. Các thông số vận hành điển hình:

- Mật độ lực bình: 13,2 kg/m²;
- Vận tốc dòng nước: 0,35 m/s;
- Quãng đường vận hành: 2 km;
- Số người vận hành: 2 người.



Hình 7. Thiết bị đóng cuộn lực bình vận hành thử nghiệm trong môi trường lực bình dày đặc tại xã Vĩnh Hưng

Từ các dữ liệu thực nghiệm thu được, công suất thực tế được suy luận và so sánh với giá trị công suất tính toán để hiệu chỉnh thiết kế. Kết quả vận hành thực tế của máy cuộn lục bình đóng bánh MCLB-2 cho ở Bảng 1 sau:

Bảng 1. Kết quả vận hành thực tế của máy cuộn lục bình đóng bánh MCLB-2

Thông số	Giá trị
Năng suất đóng cuộn, cuộn/giờ	50 ÷ 70
Nhiên liệu tiêu thụ, lít/giờ	11,8
Chi phí nhiên liệu riêng, lít/T	0,541
Kích thước cuộn lục bình, cm	70 × 30
Khối lượng cuộn lục bình, kg/m ³	40 ÷ 70

Sản phẩm cuộn có độ nén cao, tách nước tốt, sợi khô và giữ được hình dáng trong 5-7 ngày – phù hợp vận chuyển và dùng làm phân hữu cơ hoặc nguyên liệu sinh khối. Sai số giữa mô hình tính toán và kết quả thực nghiệm nhỏ, chủ yếu do các yếu tố môi trường và tổn thất truyền động.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã hoàn thiện thiết kế, chế tạo và thử nghiệm máy cuộn lục bình MCLB-2 với hiệu quả thực tế cao. Thiết bị đáp ứng yêu cầu vận hành trong điều kiện đặc thù, góp phần nâng cao hiệu quả xử lý lục bình tại các vùng kênh rạch miền Tây.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-

HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **08/7/2025**

Ngày phản biện: **23/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Châu Tấn Phát, Trương Công Sơn, Dương Văn Thắng, Đặng Vũ Bảo, Lê Minh Hiếu, Lê Phú Cường, và Phan Thị Kim Yến, “*Nghiên cứu một số phương pháp xử lý hạt trước bảo quản ảnh hưởng đến chất lượng hạt giống lúa (Oryza sativa L.)*”. Tạp chí Khoa học Đại học Văn Lang, vol. 7, no. 39(3), pp. 94-100, 2023.
- [2]. Huỳnh Kỳ và Nguyễn Thành Tâm, “*Quy trình phân tích tình trạng chất lượng lúa bằng phương pháp sinh học phân tử và sinh hóa*”. NXB. Đại học Cần Thơ, 2021.
- [3]. IRRI, “*Standard Evaluation System for Rice (5th ed.)*”. International Rice Research Institute, 2014.
- [4]. Nguyễn Thành Tâm, Nguyễn Hồng Huế, Nguyễn Văn Chánh, và Kim Thị Huyền Trân, “*Ảnh hưởng của mùa vụ và thời điểm thu hoạch đến đặc tính nông học, thành phần năng suất và phẩm chất của giống lúa IR50404*”. Tạp chí Khoa học Quốc tế AGU, vol. 24, pp. 47-58, 2020.
- [5]. Nguyễn Văn Cương và Nguyễn Hoài Tân, “*Tính toán thiết kế thùng chứa tồn trữ cám viên năng suất 500 tấn*”. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, vol. 30, pp. 30-38, 2014.
- [6]. Phan Văn Thơm, “*Những mất mát lương thực trong quá trình thu hoạch và tồn trữ*”. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, vol. 25, pp. 75-77, 2013.
- [7]. Sarawadee Wongdecharekul và Jirasak Kongkiattikajorn, “*Storage time affects storage proteins and volatile compounds, and pasting behavior of milled rice*”. KRU Research Journal, vol. 15, pp. 852-862, 2010.

THIẾT KẾ ROBOT BỐC XẾP KHO ĐẶC CHỦNG DÙNG TAY GIÃN DÀI VÀ BĂNG TẢI MÔ-ĐUN

DESIGN OF A PICK-AND-PLACE ROBOT FOR SPECIALIZED WAREHOUSES
USING TELESCOPIC ARM AND MODULAR CONVEYOR

Phan Hoàng Long^{1,2,3}, Nguyễn Huy Hùng⁴, Dương Văn Tú^{1,2,3}, Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình thiết kế robot bốc xếp cho nhà kho đặc chủng, nơi có yêu cầu cao về an toàn và tính cơ động. Hệ thống bao gồm cánh tay giãn dài dạng ống lồng và băng tải mô-đun liên động, cho phép triển khai linh hoạt trong không gian chật hẹp của kho. Quá trình thiết kế được thực hiện dựa trên yêu cầu thực tế về kích thước, tải trọng thùng hàng và giới hạn hoạt động. Kết cấu cánh tay được mô phỏng bằng MATLAB và SolidWorks để đánh giá độ biến dạng khi chịu tải. Kết quả cho thấy thiết kế đáp ứng tốt yêu cầu về tầm với, độ cứng và trọng lượng tổng thể. Băng tải mô-đun sử dụng con lăn tích hợp động cơ, được thiết kế theo nguyên lý đồng tốc cơ khí, cho phép tháo lắp và vận chuyển dễ dàng giữa các kho.

Từ khóa: Robot bốc xếp; Nhà kho đặc chủng; Cánh tay giãn dài; Băng tải mô-đun.

ABSTRACT

This paper presents the design of a pick-and-place robot for specialized warehouses where safety and mobility are critical. The system features a telescopic arm and modular conveyor units, enabling flexible deployment in constrained environments. The design process is based on practical requirements for crate dimensions, payload, and operational range. The telescopic arm is simulated using MATLAB and SolidWorks to evaluate deflection under load. Results show that the design meets the requirements for reach, stiffness, and overall weight. The modular conveyor uses motorized rollers and a mechanical synchronization mechanism, allowing easy disassembly and transport between warehouses.

Keywords: Pick-and-place robot; Specialized warehouse; Telescopic arm; Modular conveyor.

1. TỔNG QUAN

Trong các nhà kho đặc chủng như kho quân khí, hóa chất nguy hiểm hoặc vật tư dễ cháy nổ, yêu cầu về an toàn, độ chính xác và khả năng cơ động trong quá trình xếp dỡ luôn ở mức rất cao. Việc thao tác thủ công với các thùng hàng nặng, trong không gian chật hẹp và không có kệ giá tiêu chuẩn, tiềm ẩn rủi ro lớn cho người vận hành. Ngoài ra, nhiều kho có bố trí cố định, ít lối ra vào, khiến việc triển khai thiết bị tự động gặp nhiều trở ngại.

Trong bối cảnh đó, giải pháp robot bốc xếp bán tự động đang được quan tâm nghiên cứu như một hướng tiếp cận linh hoạt và an toàn hơn. Một số nghiên cứu gần đây đã đề xuất cấu trúc robot dạng khung gantry hoặc tay giăng dài cho môi trường kho hẹp [3], [4], [5]. Tuy nhiên, phần lớn các công trình này tập trung vào mô phỏng cơ học hoặc ứng dụng dân dụng, trong khi các yêu cầu đặc thù của kho đặc chủng – như khả năng tháo lắp nhanh, môi trường hạn chế tia lửa, và vận hành an toàn – vẫn chưa được khai thác đầy đủ. Các giải pháp truyền động tuyến tính kiểu ống lồng (telescopic) hoặc băng tải mô-đun đồng bộ hóa bằng cơ khí cũng chưa được tích hợp thành hệ thống hoàn chỉnh.

Bài báo này đề xuất một giải pháp tích hợp gồm robot bốc xếp sử dụng cánh tay giăng dài tuyến tính kiểu ống lồng và băng tải mô-đun cơ khí, hướng đến khả năng triển khai nhanh, vận chuyển linh hoạt và phù hợp với điều kiện đặc thù của kho đặc chủng. Quá trình thiết kế tập trung vào hai bài toán kỹ thuật chính:

- (1) Thiết kế băng tải mô-đun sử dụng con lăn tích hợp động cơ và cơ cấu đồng tốc cưỡng bức;
- (2) Thiết kế cánh tay robot có thể giăng dài, thu gọn, đáp ứng yêu cầu về tầm với, độ cứng và khả năng chịu tải.

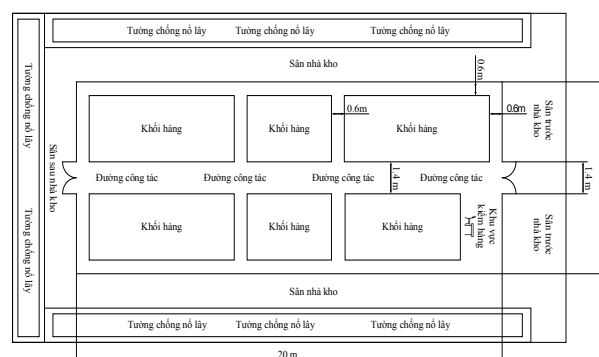
2. CẤU HÌNH HỆ THỐNG VÀ YÊU CẦU THIẾT KẾ

2.1. Cấu hình hệ thống

Hệ thống robot bốc xếp được thiết kế gồm ba cụm chức năng chính (Hình 1):

- (1) Cụm robot bốc xếp: Di chuyển dọc theo trục kho, thực hiện thao tác nâng – giăng – gấp nhằm lấy hoặc đặt thùng hàng lên khối xếp.
- (2) Băng tải mô-đun: Vận chuyển thùng hàng giữa cửa kho và vị trí bốc xếp; cấu trúc dạng lắp ghép để triển khai nhanh và cơ động.
- (3) Bộ điều khiển trung tâm: Điều phối hoạt động, đồng bộ hóa các cụm chức năng, và cho phép thao tác bán tự động.

Cấu trúc nhà kho đặc chủng được khảo sát có chiều dài ~20 m, chiều rộng ~6 m, chiều cao trần dưới 3 m và chỉ có 2 cửa ra vào đối diện nhau. Hàng hóa là các thùng gỗ kín, kích thước từ $0,4 \times 0,3 \times 0,3$ m đến $0,6 \times 0,5 \times 0,5$ m, khối lượng tối đa 45 kg, được xếp trực tiếp theo khối, không có kệ.



Hình 1. Cấu trúc tổng thể hệ thống robot bốc xếp kho đặc chủng

2.2. Yêu cầu thiết kế

Dựa trên khảo sát và đặc thù vận hành thực tế, hệ thống cần thỏa mãn các yêu cầu sau: 

- Tầm với: Cánh tay robot phải đạt tầm vươn tối thiểu 2,2m tính từ trục giữa, để với tới các hàng ngoài cùng của khối xếp.

- Khả năng thu gọn: Chiều dài thu gọn của cánh tay không vượt quá 0,8m để đảm bảo gọn nhẹ và cơ động.

- Tải trọng nâng: Tối thiểu 45kg cho mỗi thao tác gấp hoặc đặt thùng.

- Băng tải: Có thể tháo lắp từng mô-đun, chiều dài mỗi mô-đun khoảng 1,5m; khi ghép nối đảm bảo chiều dài tổng thể ≥ 18 m.

- Cơ động và tháo lắp nhanh: Toàn hệ thống có thể lắp đặt trong vòng <30 phút bởi 2 người vận hành.

- An toàn: Thiết kế phù hợp môi trường phòng nổ (nhiệt độ <50°C, không phát sinh tia lửa, kết cấu kín).

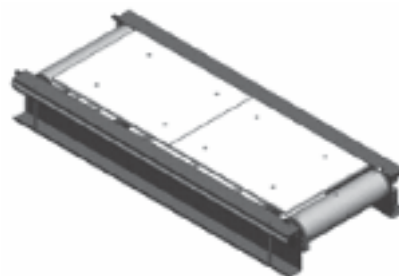
3. THIẾT KẾ BĂNG TẢI MÔ-ĐUN

3.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Băng tải được chia thành các mô-đun độc lập, mỗi mô-đun có chiều dài khoảng 1,5m, cho phép tháo lắp nhanh và vận chuyển dễ dàng giữa các kho. Khi ghép nối liên tiếp, hệ thống có thể đạt chiều dài tổng thể lên đến $18 \div 20$ m để phục vụ toàn bộ chiều sâu kho.



a. Khi hoạt động



b. Khi gấp gọn

Hình 2. Cấu trúc mô-đun băng tải

Mỗi mô-đun sử dụng con lăn truyền động tích hợp động cơ điện (drum motor) đặt bên trong trục, giúp giảm không gian lắp đặt, tăng độ bền và hạn chế hư hỏng do bụi hoặc độ ẩm. Một mô-đun tiêu chuẩn bao gồm:

- Hai trục tang trống (con lăn truyền động);
- Khung nhôm chữ C gia công mỏng nhẹ;
- Tấm đỡ nhựa kỹ thuật ma sát thấp (vật liệu Igus);
- Cặp bánh răng đồng tốc gắn hai đầu mô-đun để cường bức đồng tốc khi ghép nối.

3.2. Tính toán thiết kế cơ bản

Các thông số thiết kế được xác định như sau:

- Khối lượng thùng lớn nhất: 45kg;
- Tốc độ băng tải yêu cầu: 12m/phút;
- Chiều rộng băng tải hữu dụng: 0,6m;
- Thời gian làm việc liên tục: 30phút/chu kỳ.

Từ đó, vận tốc quay của tang trống được tính theo công thức:

$$v = \pi n D \rightarrow n = \frac{v}{\pi D}$$

Chọn đường kính tang trống $D = 60$ mm,

ta được: $n \sim 64$ vòng/phút.

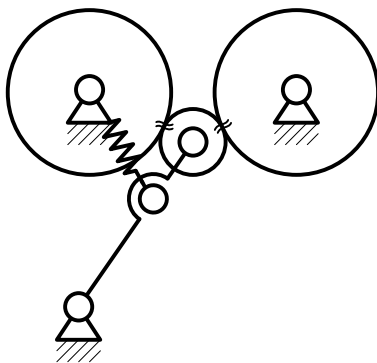
Công suất cần thiết cho một mô-đun được xác định dựa trên lực kéo và hiệu suất:

$$P = \frac{Fv}{\eta}$$

Với: μ – Hệ số ma sát, $\mu \approx 0$; F – Lực kéo, $F \approx 130\text{N}$; η – Hiệu suất hệ thống, $\eta \approx 0,8$, ta tính được $P \approx 10\text{W}$. Chọn động cơ BLDC công suất 25W là phù hợp, có dự phòng an toàn cao.

3.3. Cơ cấu đồng tốc giữa các mô-đun

Các mô-đun được thiết kế liên kết qua cặp bánh răng đồng tốc ba bánh (Hình 3), giúp cường bức đồng bộ tốc độ quay giữa các mô-đun mà không cần điều khiển điện tử phức tạp. Khi không sử dụng, cặp bánh răng này có thể gập xuống để gọn gàng.



Hình 3. Cơ cấu truyền đồng tốc ba bánh răng giữa hai mô-đun

3.4. Mô phỏng và kiểm chứng kết cấu

Mô hình mô-đun được dựng trong SolidWorks và kiểm tra biến dạng khi tải trọng 60kg (gồm thùng hàng và hệ số an toàn 1, 3).



Hình 4. Kết quả mô phỏng biến dạng khung mô-đun khi chịu tải

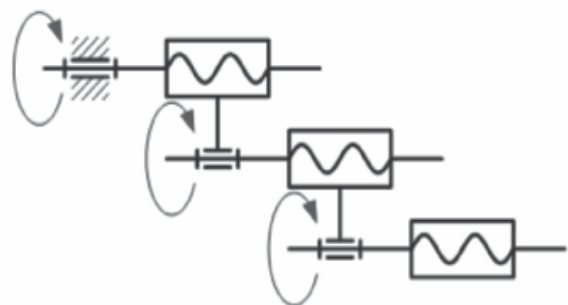
Kết quả mô phỏng cho thấy:

- Ứng suất tập trung chủ yếu tại chân đỡ và khớp nối giữa trục – khung;
- Độ võng nhỏ hơn 2mm, trong giới hạn cho phép;
- Khả năng tháo lắp và gập gọn dễ dàng nhờ thiết kế chân gập.

4. THIẾT KẾ CÁNH TAY GIÃN DÀI

4.1. Yêu cầu và nguyên lý hoạt động

Cánh tay giãn dài là thành phần then chốt trong hệ thống robot, đảm nhiệm việc mở rộng tầm với từ vị trí thân chính ra các khối hàng sâu bên trong kho. Theo yêu cầu thiết kế, cánh tay cần đạt tầm vươn tối thiểu 2,2m và có khả năng thu gọn còn 0,8m, đồng thời mang tải trọng thùng hàng lên đến 45kg.



Hình 5. Nguyên lý hoạt động của cánh tay giãn dài dạng ống lồng

Cấu trúc được chọn là ống lồng dạng tuyến tính (telescopic linear actuator), sử dụng truyền động bằng trục vít me và chuyển động tuyến tính thông qua hệ thanh trượt - con trượt có ma sát thấp. Hệ thống không yêu cầu đồng thời mở rộng toàn bộ các tầng, cho phép điều khiển chính xác vị trí đầu công tác mà không làm tăng khối lượng và độ phức tạp cơ khí.

4.2. Cấu trúc và vật liệu

Cánh tay gồm 5 khung hộp kim loại lồng vào nhau, với tiết diện hình vuông rỗng (kích thước cạnh giảm dần), làm bằng nhôm 6061-T6 để đảm bảo độ bền và khối lượng nhẹ. Kết cấu điển hình:

- Khung ngoài cùng (khung gốc) được gắn cố định vào cụm nâng hạ;
- Mỗi khung bên trong được dẫn động bằng vít me bi riêng, gắn trên con trượt tuyến tính;
- Ray trượt làm bằng thép tôi, gắn dọc theo trục các khung;
- Giới hạn chuyển động được kiểm soát bằng cảm biến hành trình.

Chiều dài phủ lấp giữa các khung được thiết kế tối ưu để đảm bảo độ cứng và giảm biến dạng khi chịu lực ngoài.

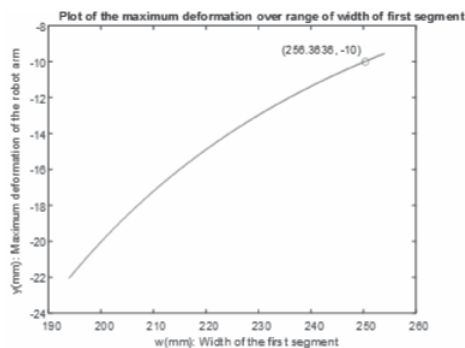
4.3. Phân tích độ cứng và mô phỏng biến dạng

Để đảm bảo độ cứng của cánh tay khi tải trọng tối đa, mô hình tính toán được thiết lập giả định cánh tay là một dầm công xôn nhiều đoạn có tiết diện thay đổi. Phương trình biến dạng được thiết lập theo tích phân mô-men uốn:

$$\delta_{max} = \sum_{i=1}^3 \frac{FL_i^3}{3EI_i}$$

Với: F – Tải trọng ($45\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2$); E – Mô đun đàn hồi của nhôm; I_i – Mô-men quán tính tiết diện khung thứ i ; L_i – Chiều dài đoạn khung thứ i .

Mô phỏng được thực hiện trên MATLAB để xác định mối quan hệ giữa độ cứng và kích thước khung. Sau đó, mô hình được kiểm chứng bằng SolidWorks Simulation để đánh giá ứng suất và độ võng dưới tải trọng.



a. Độ biến dạng với giá trị $a = 200 \div 260\text{mm}$



b. Độ biến dạng với giá trị $a = 260\text{mm}$



c. Độ biến dạng với giá trị $a = 265\text{mm}$



d. Độ biến dạng với giá trị $a = 270\text{mm}$

Hình 6. Kết quả mô phỏng biến dạng cánh tay giãn dài bằng MATLAB và SolidWorks

Kết quả cho thấy độ biến dạng lớn nhất nằm trong giới hạn cho phép ($<8\text{mm}$), tập trung tại vùng đầu khung trong cùng. Các thông số thiết kế cuối cùng được chọn:

- Số tầng ống lồng: 5;
- Khung lớn nhất: $80 \times 80\text{mm}$;
- Chiều dài tổng thể mở rộng: $2,2\text{m}$;
- Độ võng cực đại khi tải: $\sim 6,7\text{mm}$;
- Tổng khối lượng cánh tay: $\sim 11,5\text{kg}$.

5. ĐÁNH GIÁ VÀ KẾT LUẬN

5.1. Đánh giá hiệu quả thiết kế

Thông qua quá trình thiết kế và mô phỏng, hệ thống robot bốc xếp kho đặc chủng đã đáp ứng được các tiêu chí kỹ thuật chính sau:

- Khả năng triển khai linh hoạt: Hệ thống có thể tháo lắp nhanh, di chuyển giữa các nhà kho mà không cần phương tiện chuyên dụng.

- Độ tin cậy và an toàn: Băng tải và cánh tay robot đều được thiết kế có dự phòng tải trọng với hệ số an toàn $\geq 1,3$; kết cấu kín, phù hợp với môi trường có nguy cơ cháy nổ.

- Tính khả thi chế tạo: Cấu trúc sử dụng vật liệu phổ biến như nhôm định hình, thép hợp kim và các mô-đun điện cơ sẵn có, phù hợp sản xuất trong nước.

- Hiệu suất thao tác: Mô phỏng cho thấy robot có thể tiếp cận toàn bộ khối hàng với độ biến dạng thấp, hệ thống băng tải đảm bảo dòng chảy vật liệu liên tục và đồng bộ.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật chính của hệ thống

Thông số	Giá trị
Tầm với tối đa của cánh tay, m	2,2
Chiều dài thu gọn, m	0,8
Khối lượng nâng tối đa, kg	45
Độ võng cực đại khi tải, mm	$\approx 6,7$
Thời gian lắp 1 mô-đun băng tải, phút	< 5
Tổng chiều dài hệ băng tải, m	$18 \div 20$
Số người lắp đặt/vận hành, người	2

5.2. Kết luận

Bài báo đã trình bày một hướng tiếp cận thực tiễn trong việc thiết kế hệ thống robot bốc xếp dành cho nhà kho đặc chủng, tập trung vào hai thành phần quan trọng là băng tải mô-đun và cánh tay giãn dài. Cấu hình hệ thống cho phép thích ứng linh hoạt với các loại nhà kho có lối ra vào hạn chế, không sử dụng kệ và yêu cầu vận hành an toàn cao.

Thông qua mô phỏng số và phân tích kết cấu, nhóm nghiên cứu đã xác minh tính khả thi và độ bền của các thành phần chính. Thiết kế có tiềm năng ứng dụng trong thực tế, đặc biệt trong lĩnh vực kho hóa chất và các hệ thống kho lưu trữ nguy hiểm.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/7/2025

Ngày phản biện: 23/7/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Tấn Tiến, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, “Thiết kế và điều khiển con lăn điện cho băng tải”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 295, tr. 45-49, 2022.
- [2]. Brian Kean, Gerhard Schwarz, Peter Thurnherr, “IEC 60079-14: Electrical installation design, selection, and erection”. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 21, no. 3, pp. 12-19, 2015.
- [3]. A. Alavizadeh, H. D. Taghirad, “Design and control of a new gantry-tau parallel manipulator”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 6, pp. 3454-3462, 2016.
- [4]. J. Angeles, “Fundamentals of robotic mechanical systems: Theory, methods, and algorithms”, 4th ed.. Springer, 2014.
- [5]. Vũ Đình Tiến, Nguyễn Hữu Phú, “Tính toán biến dạng của cánh tay robot kiểu dầm công xôn bằng phương pháp phần tử hữu hạn”. Tạp chí Khoa học & Công nghệ, Đại học Bách khoa Hà Nội, Tập 57, Số 3, tr. 77-84, 2019.
- [6]. Nguyen Van Tu, Nguyen Huy Hung, Tran Quang Vinh, “Mechanical design and simulation of a telescopic robot arm using MATLAB/Simulink”. Journal of Automation and Control Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 65-71, 2021.
- [7]. N. G. Tsagarakis, D. Caldwell, “Development and control of a ‘soft-actuated’ exoskeleton for use in physiotherapy and training”. Autonomous Robots, vol. 15, no. 1, pp. 21-33, 2003.

NGHIÊN CỨU CẢI TIẾN THIẾT KẾ SILO CHỨA NÔNG SẢN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ BẢO QUẢN LẠNH

A STUDY ON IMPROVED DESIGN OF AGRICULTURAL STORAGE CONTAINERS FOR COLD STORAGE

Vũ Viết Toàn¹, Lê Thanh Sơn⁴, Phan Hoàng Long^{1, 2, 3}, Nguyễn Tấn Tiến^{1, 2, 3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Công ty Cổ phần Cơ khí Chế tạo máy Long An

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình thiết kế và đánh giá silo chứa nông sản tích hợp hệ thống làm lạnh và giám sát từ xa. Trên cơ sở mô hình toán mô tả động học nhiệt bên trong thùng, bộ điều khiển PID được thiết kế để duy trì nhiệt độ tối ưu, đồng thời hệ thống cảm biến và giám sát IoT giúp kiểm soát vận hành hiệu quả. Kết quả mô phỏng và triển khai thực tế cho thấy tính khả thi và hiệu quả của giải pháp này.

Từ khóa: Bảo quản lạnh; Silo chứa nông sản; Giám sát từ xa.

ABSTRACT

The paper presents the design and evaluation of an agricultural storage container integrated with a cooling system and remote monitoring capabilities. Based on a mathematical model describing the thermal dynamics inside the container, a PID controller is designed to maintain optimal temperature, while a sensor network and IoT-based monitoring system enable efficient operational control. Simulation and practical implementation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed solution.

Keywords: Cold storage; Agricultural storage container; Remote monitoring.



1. TỔNG QUAN

Việt Nam là quốc gia nông nghiệp với sản lượng lúa gạo lớn hàng đầu thế giới. Tuy nhiên, tổn thất sau thu hoạch vẫn còn cao, đặc biệt trong giai đoạn bảo quản. Nguyên nhân chủ yếu đến từ điều kiện bảo quản chưa tối ưu như độ ẩm cao, nhiệt độ không kiểm soát và sự xâm nhập của côn trùng, nấm mốc.

Trong số các phương pháp bảo quản hiện nay (bảo quản khô, thông thoáng, kín, hóa chất, lạnh), phương pháp bảo quản lạnh được đánh giá là hiệu quả nhất để duy trì chất lượng nông sản trong thời gian dài. Phương pháp này làm chậm quá trình sinh lý của hạt, hạn chế sự phát triển của vi sinh vật và côn trùng, đồng thời bảo toàn giá trị dinh dưỡng của nông sản. Tuy nhiên, nhược điểm là chi phí đầu tư cao và cần hệ thống điều khiển chính xác, ổn định.

Việc ứng dụng bảo quản lạnh còn gặp nhiều rào cản, đặc biệt là hệ thống silo chứa chưa được tối ưu để phù hợp với đặc tính nhiệt động học của khối hạt. Ngoài ra, hệ thống làm lạnh hiện tại chủ yếu dựa vào luồng khí lạnh trung tâm, dẫn đến phân bố nhiệt không đều, gây nên các điểm nóng (hot spots), ảnh hưởng đến chất lượng toàn khối.

Trong bối cảnh đó, bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu, thiết kế và đánh giá một mô hình silo chứa cải tiến, tích hợp: Hệ thống phân phối khí lạnh có kênh phụ để đảm bảo phân bố nhiệt đều; Bộ điều khiển PID ổn định nhiệt độ dựa trên mô hình toán học động học nhiệt; và Hệ thống giám sát từ xa tích hợp IoT cho phép theo dõi liên tục và điều chỉnh kịp thời.

Giải pháp đề xuất không chỉ cải thiện điều kiện bảo quản, mà còn hướng đến tối ưu

hóa vận hành và tiết kiệm năng lượng, góp phần xây dựng hệ thống bảo quản nông sản hiện đại, hiệu quả và bền vững hơn tại Việt Nam.

2. LÝ THUYẾT SILO CHỨA LẠNH

2.1. Thiết kế cơ học và cách nhiệt

Tải trọng thùng xác định theo lý thuyết silo Janssen: Áp suất đáy và bên.

$$p_{\text{đáy}} = \frac{s\gamma}{4K} \left(1 - e^{-\frac{4Kx}{s}} \right) \quad (1)$$

Với: $p_{\text{đáy}}$ – Áp lực lên đáy thùng, kPa; s – Chiều cao lớp hạt trong thùng, m; K – Hệ số áp lực ngang; γ – Khối lượng riêng của hạt, N/m³; x – Vị trí tính toán áp lực, m.

$$p_{\text{bên}} = 0.75p_{\text{đáy}} < p_{\text{đáy}} \quad (2)$$

Với: $p_{\text{bên}}$ – Áp lực lên vách thùng, kPa.

Lấy giá trị áp suất tại đáy, tiến hành lựa chọn bề dày thùng:

$$\sigma = \frac{[s]p_{\text{đáy}}a}{t_{\text{đáy}}} \rightarrow t_{\text{bên}} = \frac{[s]p_{\text{đáy}}a}{\sigma} \quad (3)$$

Với: σ – Ứng suất cho phép, MPa; $t_{\text{bên}}$ – Bề dày thiết kế, m; $[s]$ – Hệ số an toàn chung.

Bề dày thùng cần đảm bảo cả yêu cầu bền cơ học và hạn chế thất thoát nhiệt. Đối với yếu tố cách nhiệt, bề dày của silo chứa được xác định:

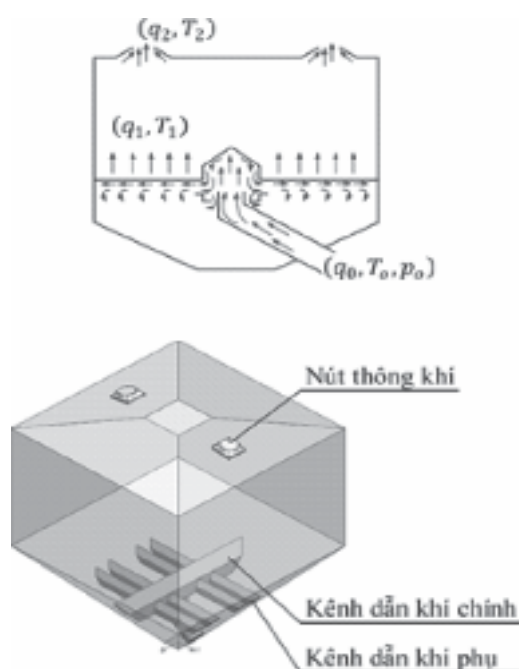
$$Q = \frac{A\Delta TK}{t_{\text{nhiệt}}} \rightarrow t_{\text{nhiệt}} = \frac{A\Delta TK}{Q} \quad (4)$$

Với: A – Diện tích bề mặt thùng, m²; ΔT – Chênh lệch nhiệt độ, °C; K – Hằng số dẫn nhiệt, W/m.K.

Bổ sung lớp cách nhiệt ngoài đảm bảo nhiệt độ bên trong ổn định.

2.2. Hệ thống dẫn khí lạnh

Silo chứa được thiết kế với hệ thống thông gió cưỡng bức, tích hợp tạo khí lạnh, dẫn qua các ống và kênh khí giúp phân phối đều không khí bên trong. Sơ đồ nguyên lý của silo chứa có hệ thống phân khối khí có kênh dẫn như sau:



Hình 1. Hệ thống phân phối khí

Các kênh dẫn khí giải quyết hai vấn đề:

1) Phân phối đồng đều luồng không khí:

Không khí lạnh được đưa vào silo chứa qua một kênh dẫn chính. Việc thêm các kênh phụ giúp chia nhỏ và hướng dòng không khí đến các vùng khác nhau của silo chứa, nhờ đó phân phối đồng đều luồng không khí giúp giảm thiểu các “điểm nóng” (hot spots) và “điểm lạnh” (cold spots), đảm bảo toàn bộ khối hạt

được làm mát đồng đều, từ đó hạn chế sự phát triển của vi sinh vật và côn trùng.

2) Giảm áp lực đối kháng:

Khi chỉ có một kênh dẫn chính, áp lực đối kháng (trở lực) trong khối hạt sẽ rất cao do không khí phải di chuyển qua một lượng lớn hạt. Các kênh dẫn phụ giúp giảm áp lực này bằng cách phân chia luồng không khí thành nhiều phần nhỏ hơn, mỗi phần di chuyển qua một phần của khối hạt với lực cản ít hơn. Việc này giúp giảm áp lực đối kháng giúp tăng hiệu quả của hệ thống làm mát, giảm công suất cần thiết của quạt và máy lạnh, từ đó tiết kiệm năng lượng và chi phí vận hành.

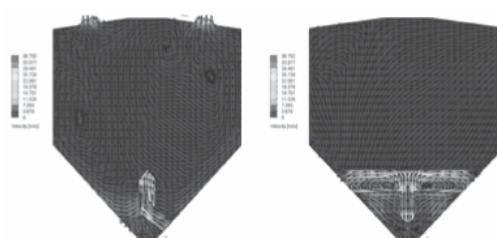
Chọn loại nguồn cấp khí lạnh dựa vào áp lực [2]:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{aV_{bm}^2}{\ln(1 + bV_m)} \quad (5)$$

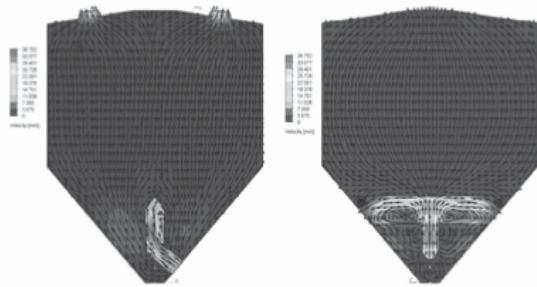
Với: ΔP – Áp suất tĩnh của khối hạt, Pa;
 h – Chiều cao khối hạt, m; V_{bm} – Lưu lượng không khí qua 1 m²; a, b – Chọn theo dạng hạt bảo quản.

3. MÔ PHỎNG THÔNG KHÍ CÓ KÊNH PHỤ

Mô phỏng được tiến hành để khảo sát các việc thông khí trong hai trường hợp không có và có kênh thông khí phụ đề xuất như trên với cùng một điều kiện biên cho kết quả như sau:



a. Chỉ có kênh dẫn khí chính



b. Có kênh dẫn khí phụ
Hình 2. Hệ thống phân phối khí

Kết quả mô phỏng CFD cho cả hai mô hình cho thấy ở mô hình có kênh dẫn phụ, luồng khí được phân bố đều hơn. Vận tốc trong kênh chính được chia đều vào các kênh nhỏ, giúp khí lưu thông đều và hướng từ dưới lên đến điểm thoát hơi phía trên. Ở mô hình chỉ có kênh dẫn khí chính, xuất hiện hiện tượng xoáy khí và áp lực trong ống chính tăng cao do vận tốc lớn hơn nhiều so với mô hình có kênh phụ. Hai mô hình, có/không có kênh phụ, chứng minh luồng khí trong mô hình có kênh phụ phân bố đều hơn, ít xoáy khí, hiệu quả làm lạnh cao hơn.

Do đó, việc thiết kế kênh phụ giúp phân phối đồng đều luồng khí, tránh “điểm nóng/lạnh” và giảm áp lực kháng, từ đó giảm công suất quạt.

4. ĐIỀU KHIỂN VÀ GIÁM SÁT

1) Bộ điều khiển

Mô hình cân bằng nhiệt giữa hạt và không khí được thiết lập trong từng thể tích kiểm soát. Ba quá trình truyền nhiệt chính được xem xét:

- Đối lưu giữa không khí và lớp hạt: Giúp duy trì nhiệt độ đồng đều trong khối hạt.
- Đối lưu giữa không khí và tường silo chứa: Ảnh hưởng đến hiệu quả làm mát bên trong thùng.

- Dẫn nhiệt qua tường silo chứa: Làm thay đổi nhiệt độ không khí bên trong do chênh lệch với môi trường ngoài.

Định luật thứ nhất của nhiệt động lực học được áp dụng để bảo toàn nội năng toàn hệ [4], [5]:

$$\Delta U = \Delta Q - W \quad (6)$$

Với: ΔU – Thay đổi nội năng của hệ;
 Q – Nhiệt lượng tham gia vào hệ; W – Công suất được tạo ra từ hệ.

Phương trình trạng thái của hệ được thiết lập ở dạng:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + Bu + DT_w + E \quad (7)$$

$$y = C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

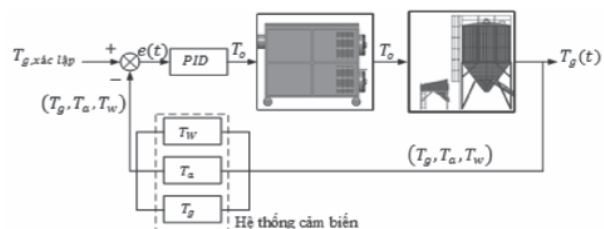
Với: $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{13} & a_{14} \end{bmatrix}$

$$a_{11} = \frac{-h_{ca,g}A_g}{m_g C_g} = a_{12}$$

$$a_{13} = \frac{-h_{ca,g}A_g}{\rho_a V_a C_a}$$

$$a_{14} = \frac{-q_o}{\rho_a V_a} - \frac{h_{ca,g}A_g}{\rho_a V_a C_a} - \frac{h_{ca,w}A_w}{\rho_a V_a C_a}$$

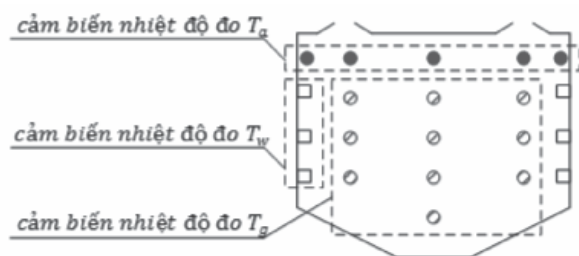
Trên cơ sở phương trình (6), sử dụng bộ điều khiển PID thông dụng, ta có sơ đồ khối điều khiển sau:



Hình 3. Hệ điều khiển nhiệt độ silo chứa

2) Bố trí cảm biến

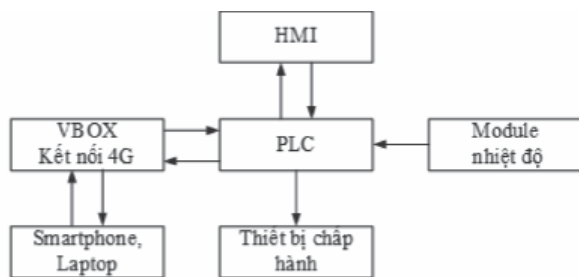
Cảm biến nhiệt độ được bố trí tại các vị trí: cửa vào/ra khí lạnh, các độ cao khác nhau trong thùng và gần tường, nhằm giám sát hiệu quả làm mát, phân bố nhiệt độ theo chiều cao và ảnh hưởng từ môi trường ngoài. Cảm biến có dải đo $0 \div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, đảm bảo độ chính xác cao trong vùng làm việc $0 \div 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ của môi trường bảo quản.



Hình 4. Bố trí cảm biến

3) Giám sát

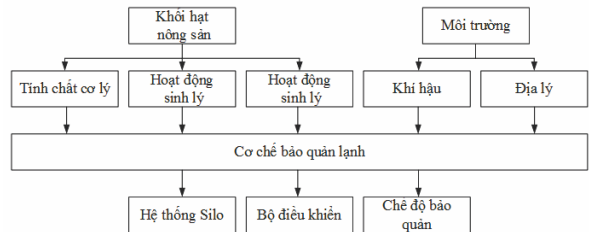
Hệ thống giám sát từ xa sử dụng thiết bị thông minh và kết nối 4G để theo dõi, lưu trữ và phân tích nhiệt độ, giúp quản lý linh hoạt và hiệu quả.



Hình 5. Sơ đồ khối hệ thống giám sát

Chất lượng bảo quản phụ thuộc vào nhiều yếu tố liên quan đến môi trường xung quanh và đặc tính của khối hạt. Trong đó, ẩm độ khối hạt, ẩm độ tương đối của không khí, nhiệt độ trong khối hạt và nhiệt độ môi trường, cùng kỹ thuật thông thoáng đóng vai trò quyết định trong việc tạo ra môi trường tiêu khí hậu

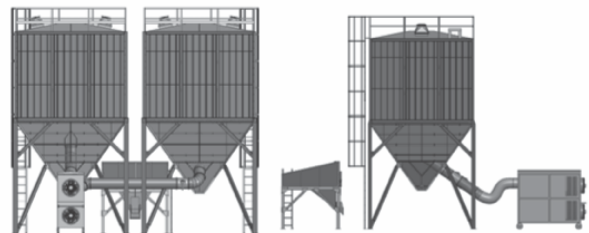
bên trong thùng bảo quản. Nghiên cứu mối quan hệ giữa môi trường bảo quản và đặc tính của nông sản là cơ sở để xác định công nghệ bảo quản, thiết bị và chế độ vận hành bảo quản tối ưu.



Hình 6. Đề xuất mô hình bảo quản có giám sát

5. KẾT QUẢ

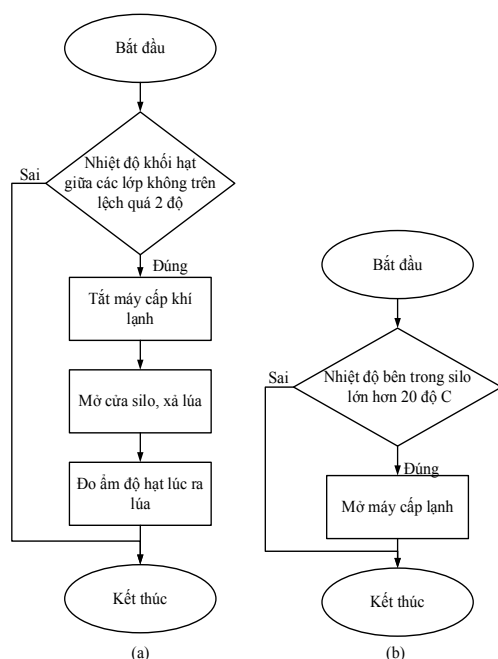
Đề xuất mô hình thiết kế silo chứa như sau:



Hình 7. Mô hình thiết kế

Để bảo quản hạt với mức hao hụt tối thiểu và duy trì chất lượng cũng như hiệu quả kinh tế, cần phải hiểu rõ các đặc tính của khối hạt và các quá trình diễn ra trong đó. Nghiên cứu này nhằm xác định những yếu tố đó, qua đó đưa ra các biện pháp bảo quản tốt nhất.





Hình 8. Lưu đồ giải thuật áp dụng cho lúa: a. Quy trình đo đạc kiểm tra mỗi 6 tháng; b. Quy trình nhắc lạnh khi vướng điều kiện nhiệt

Ở nhiệt độ $25 \div 35^\circ\text{C}$, hoạt động sống của hạt thường xuyên diễn ra, đồng thời thúc đẩy sự phát triển của côn trùng và nấm mốc. Bảo quản lạnh khối hạt ngăn chặn điều này dựa trên điều kiện nhiệt độ. Nếu nhiệt độ của lớp trên gần mặt thoáng lớn hơn nhiệt độ của lớp dưới 2°C , sẽ thực hiện làm lạnh. Nhiệt độ bảo quản trung bình của toàn khối hạt dự kiến duy trì trong khoảng $25 \div 35^\circ\text{C}$.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất và triển khai thành công mô hình silo chứa tích hợp hệ thống bảo quản lạnh và giám sát từ xa. Giải pháp mang lại hiệu quả trong kiểm soát nhiệt độ, tiết kiệm năng lượng và nâng cao chất lượng nông sản.

Định hướng tiếp theo: Tích hợp trí tuệ nhân tạo và học máy cho điều khiển tối ưu; và

Mở rộng áp dụng với các loại nông sản và môi trường khác nhau.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **08/7/2025**

Ngày phản biện: **22/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. T. De Bruin, S. Navarro, P. Villers, and A. Wagh, "Worldwide use of hermetic storage for the preservation of agriculture product", 2012.
- [2]. M. Sperl, "Experiments on corn pressure in silo cells". Granul Matter, vol. 8, no. 2, pp. 59-65, May 2006, doi: 10.1007/s10035-005-0224-z.
- [3]. Z. Zhang, "A Review of Silo Temperature Field Studies". Adv Res, vol. 25, no. 1, pp. 26-35, Jan. 2024, doi: 10.9734/air/2024/v25i11015.
- [4]. F. Pfeiffer and H. Bremer, "The Art of Modeling Mechanical Systems", 2018. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/76>
- [5]. M. A. Daviess and T. L. Schmitz, "System Dynamics for Mechanical Engineers", 2021.

NGHIÊN CỨU BẢO QUẢN LÚA BẰNG PHƯƠNG PHÁP THÔNG THOÁNG LẠNH

A STUDY ON RICE PRESERVATION USING COOLED VENTILATION METHOD

Vũ Viết Toàn¹, Lê Thanh Sơn⁴, Phan Hoàng Long^{1, 2, 3}, Nguyễn Tấn Tiến^{1, 2, 3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Công ty Cổ phần Cơ khí Chế tạo máy Long An

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu so sánh hiệu quả bảo quản lúa LT28 bằng hai phương pháp: (1) thông thoáng lạnh trong thùng chứa và (2) bao jumbo truyền thống. Sau 6 tháng bảo quản, thùng chứa duy trì nhiệt độ ổn định ($17,6 \pm 2,2$ °C), giữ tỷ lệ nảy mầm cao (69,5%), trong khi bao jumbo giảm xuống còn 11% sau 4 tháng và gần như bằng 0 sau 6 tháng. Các chỉ tiêu về độ ẩm, gạo nguyên và hàm lượng protein cũng cho thấy hiệu quả vượt trội của phương pháp thông thoáng lạnh.

Từ khóa: Lúa; Tồn trữ lạnh; Thùng chứa; Phẩm chất hạt; Nảy mầm.

ABSTRACT

This study compares two storage methods for LT28 rice: (1) cooled ventilation in containers and (2) traditional jumbo bags. After 6 months, the container method maintained a stable temperature (17.6 ± 2.2 °C) and 69.5% germination, while jumbo bags dropped to 11% after 4 months and nearly zero after 6 months. Results on moisture, head rice yield, and protein content confirm the superior performance of cooled ventilation.

Keywords: Rice; Cold storage; Container; Grain quality; Germination rate.



1. TỔNG QUAN

Lúa gạo là ngành hàng chủ lực trong phát triển kinh tế – xã hội của Việt Nam, đặc biệt tại Đồng bằng sông Cửu Long. Cùng với cải tiến giống năng suất cao, tập quán canh tác đã chuyển từ phơi sấy, bảo quản thủ công sang mô hình liên kết – tiêu thụ theo hợp đồng. Điều này đòi hỏi doanh nghiệp đầu tư hệ thống tồn trữ hiệu quả để giữ chất lượng lúa trong thời gian chờ chế biến hoặc xuất khẩu.

Trong chuỗi giá trị lúa gạo, công đoạn tồn trữ giữ vai trò then chốt nhằm giảm tổn thất sau thu hoạch và nâng cao giá trị sản phẩm. Các phương pháp hiện hành như dùng bao PP, PE (Châu Tấn Phát & cs., 2023) hay phân tích tổn thất (Phan Văn Thơm, 2013) có những giới hạn về chi phí và hiệu quả. Gần đây, công nghệ bảo quản thông thoáng lạnh được ứng dụng thử nghiệm cho lúa, bắp, đậu nành... và bước đầu mang lại kết quả tích cực. Tuy vậy, một số nghiên cứu như của Nguyễn Văn Cương và Nguyễn Hoài Tân (2014) mới dừng ở đánh giá kết cấu, chưa phân tích sâu về phẩm chất và tỷ lệ nảy mầm.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này so sánh hiệu quả bảo quản giữa hai phương pháp: (1) thông thoáng lạnh bằng thùng chứa và (2) bảo quản bằng bao jumbo (đối chứng) trong 6 tháng. Các chỉ tiêu theo dõi gồm chất lượng hạt và tỷ lệ nảy mầm, nhằm đề xuất giải pháp bảo quản hiệu quả, góp phần giảm tổn thất và nâng cao thu nhập người trồng lúa thông qua đầu tư công nghệ từ doanh nghiệp.

2. PHƯƠNG TIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

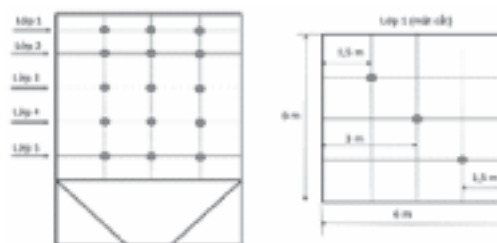
2.1. Vật liệu nghiên cứu

Giống lúa thí nghiệm: Giống lúa LT28 (EU) được sấy khô đến ẩm độ phù hợp trước khi đưa vào bảo quản.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Thí nghiệm gồm hai yếu tố: phương pháp và thời gian bảo quản. Hai phương pháp gồm: (1) thùng chứa thông thoáng lạnh gắn 5 lớp cảm biến và (2) bao jumbo truyền thống. Thời gian bảo quản kéo dài 6 tháng, lấy mẫu tại 4 mốc: trước bảo quản, sau 2, 4 và 6 tháng để đánh giá phẩm chất và tỷ lệ nảy mầm của giống lúa LT28 (EU).

Thùng chứa dung tích 140 tấn, nối với máy lạnh GRANIFRIGORTM GC220 Tropic qua ống cấp khí lạnh có bảo ôn. Thùng không cách nhiệt nhưng kín khí, gắn 17 cảm biến bố trí theo 5 lớp để giám sát nhiệt độ tại tâm và quanh khối lúa. Bao jumbo chứa 500 kg được đặt trong cùng kho, mỗi bao gắn cảm biến nhiệt tại tâm.



Hình 1. Vị trí lấy mẫu lúa trong thùng chứa

Mỗi điểm lấy mẫu thu 1 kg lúa từ 4 mặt cắt chéo trong thùng và từ các bao jumbo để phân tích các chỉ tiêu chất lượng và tỷ lệ nảy mầm.

2.3. Các chỉ tiêu theo dõi và phương pháp phân tích

Các mẫu được đánh giá định kỳ theo các chỉ tiêu:

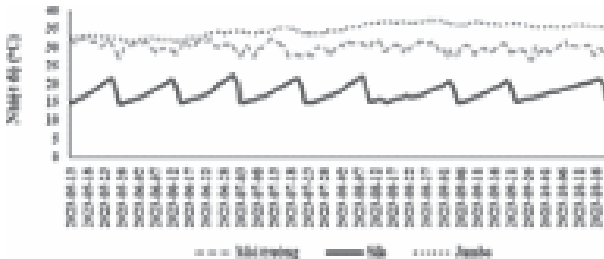
- Nhiệt độ: Ghi liên tục bằng cảm biến.
- Tỷ lệ xay xát: Theo IRRI (2014), gồm tách vỏ, chà trắng và phân loại gạo nguyên (%), thực hiện 3 lần lặp lại/mẫu.
- Độ trắng hạt gạo: Đo bằng máy MM1D.
- Tỷ lệ bạc bụng cấp 9: Đếm 200 hạt/mẫu, phân loại theo IRRI (2014), lặp lại 3 lần.
- Hàm lượng protein và amylose: Đo bằng Infratec 1241 (Đức) theo Huỳnh Kỳ & Nguyễn Thành Tâm (2021).
- Độ trở hồ: Ủ 6 hạt trong KOH 1,7% trong 23 giờ, phân cấp theo IRRI; lặp lại 3 lần.
- Tỷ lệ nảy mầm: 3 lần lặp lại, mỗi lần 100 hạt; ngâm, ủ và đánh giá sau 48 giờ.

Phân tích thống kê: Sử dụng mô hình hai nhân tố (phương pháp và thời gian bảo quản) để đánh giá ảnh hưởng đến phẩm chất và tỷ lệ nảy mầm của giống LT28.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Diễn biến nhiệt độ

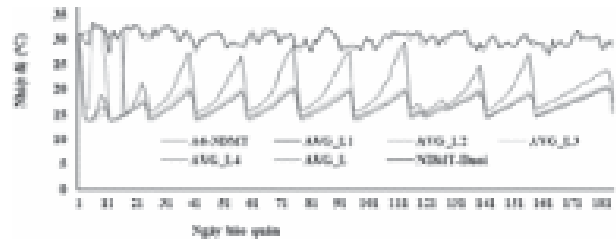
Nhiệt độ được theo dõi 5 ngày/lần. Kết quả cho thấy thùng chứa thông thoáng lạnh duy trì nhiệt độ ổn định và thấp nhất (trung bình $17,6 \pm 2,2$ °C), trong khi bao jumbo có nhiệt độ cao nhất (33,1 °C), vượt cả môi trường do tích nhiệt và hô hấp hạt lúa (Hình 2).



Hình 2. Nhiệt độ trong thùng chứa, bao Jumbo, và môi trường

Phân tích theo lớp trong thùng cho

thấy nhiệt độ giảm dần từ lớp trên xuống lớp đáy do lớp trên chịu tác động trực tiếp từ môi trường. Nhiệt độ môi trường phía trên và dưới thùng lần lượt là 29,1 °C và 30,6 °C (Hình 3), cho thấy thùng bảo quản dễ bị ảnh hưởng bởi điều kiện bên ngoài, phù hợp với nhận định của Châu Tấn Phát và cs. (2023).



Hình 3. Nhiệt độ giữa các lớp trong thùng

3.2. Ảnh hưởng của hai phương pháp tồn trữ đến chất lượng hạt

- Ẩm độ hạt lúa, độ trắng, tỷ lệ thu hồi gạo nguyên và tỷ lệ bạc bụng:

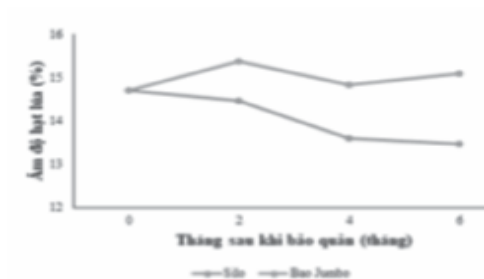
Ẩm độ lúa trong thùng chứa thông thoáng lạnh giảm dần theo thời gian, trong khi ở bao jumbo lại tăng do hút ẩm từ môi trường.

Độ trắng gạo tăng theo thời gian ở cả hai phương pháp, nhưng cao hơn ở thùng chứa. Tuy nhiên, độ trắng cao có thể làm tăng gạo gãy nếu chà quá mức.

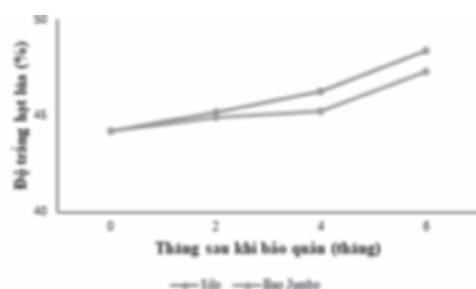
Tỷ lệ gạo nguyên giảm dần, nhưng luôn cao hơn ở phương pháp thông thoáng lạnh. Tỷ lệ bạc bụng cấp 9 dao động nhẹ (2,8-4,1%), bao jumbo cao hơn một chút nhưng không đáng kể.

Kết quả cho thấy phương pháp thông thoáng lạnh hiệu quả hơn trong việc duy trì chất lượng hạt.

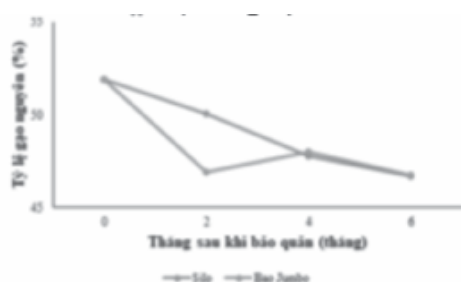




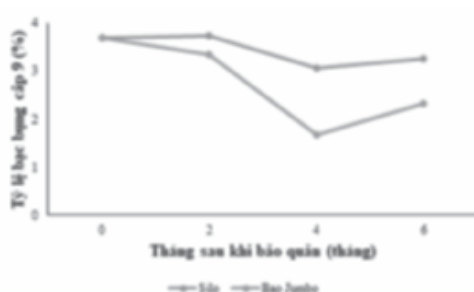
a. Ẩm độ hạt lúa



b. Độ trắng hạt lúa



c. Tỷ lệ gạo nguyên



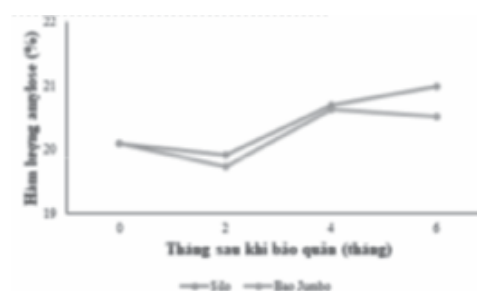
d. Tỷ lệ bạc bụng cấp 9

Hình 4. Ảnh hưởng của hai phương pháp bảo quản đến các chỉ tiêu phẩm chất gạo

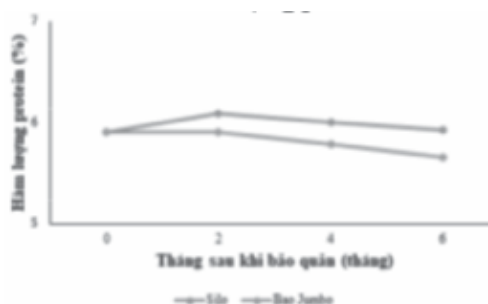
- Hàm lượng protein và hàm lượng amylose:

Sau 6 tháng, thùng chứa thông thoáng lạnh giữ ổn định hàm lượng protein ($\approx 5,9-6,1\%$), trong khi bao jumbo giảm nhẹ ($\approx 5,8\%$).

Hàm lượng amylose tăng theo thời gian ở cả hai phương pháp, cao nhất tại lớp 3-5 và thấp nhất ở lớp 1-2 và bao jumbo. Kết quả phù hợp với nghiên cứu của Wongdecharekul & Kongkiattika-jorn (2010).



a. Hàm lượng protein



b. Hàm lượng amylose

Hình 5. Ảnh hưởng của hai phương pháp bảo quản đến phẩm chất gạo

- Tỷ lệ nảy mầm:

Tỷ lệ nảy mầm giảm theo thời gian ở cả hai phương pháp. Sau 4 tháng, thùng chứa đạt 82,1%, bao jumbo chỉ còn 11%. Đến tháng thứ 6, thùng chứa còn 69,5%, trong khi bao jumbo gần như không còn khả năng nảy mầm.

Kết quả cho thấy bảo quản bằng thông thoáng lạnh duy trì chất lượng giống tốt hơn rõ rệt.

- Phẩm chất hạt của lúa LT28:

• Ẩm độ hạt lúa

Ẩm độ hạt lúa khác biệt theo lớp và thời gian, có tương tác ý nghĩa ở mức 1%. Bao jumbo và lớp 1 có ẩm độ cao nhất; lớp 4 thấp nhất. Ẩm độ giảm dần theo thời gian, thấp nhất sau 6 tháng.

• Tỷ lệ thu hồi gạo nguyên

Tỷ lệ gạo nguyên giảm từ 51,9% còn 46,7% sau 6 tháng. Bao jumbo và lớp 3 thấp nhất, lớp 1 và 5 cao nhất. Bảo quản bằng bao jumbo làm giảm hiệu quả thu hồi gạo nguyên.

• Tỷ lệ bạc bụng cấp 9

Tỷ lệ bạc bụng cấp 9 (2,8-4,1%) và độ trở hồ (cấp 6) không bị ảnh hưởng rõ bởi thời gian hay phương pháp tồn trữ. Độ trở hồ chủ yếu do giống quyết định, còn bạc bụng có thể bị ảnh hưởng bởi thời tiết và thu hoạch, nhưng chưa thấy rõ trong 6 tháng bảo quản.

• Độ trắng hạt gạo

Độ trắng gạo tăng theo thời gian, từ 44,2% lên 48,2% sau 6 tháng. Lớp 4 và 5 có độ trắng cao nhất (46,9%), thấp nhất là lớp mặt (44,7%), tiếp theo là lớp 2 và bao jumbo (45,3-45,4%). Kết quả cho thấy lớp tiếp xúc nhiều với môi trường có độ trắng thấp hơn theo thời gian.

• Hàm lượng protein

Hàm lượng protein giảm dần theo thời gian, từ 6,1% sau 2 tháng còn 5,9% sau 6 tháng (Bảng 6). Lớp 4 có giá trị cao nhất (6,1%), bao jumbo thấp nhất (5,8%), phù hợp với kết quả của Wongdechsaekul & Kongkiattikajorn (2010).

• Hàm lượng amylose

Hàm lượng amylose tăng theo thời gian, dao động từ 19,89% đến 20,90%, phù hợp với nghiên cứu của Wongdechsaekul & Kongkiattikajorn (2010). Sự khác biệt giữa các phương pháp tồn trữ có ý nghĩa thống kê; lớp 3, 4 và 5 có amylose cao nhất, thấp nhất ở lớp 1, 2 và bao jumbo.

• Tỷ lệ nảy mầm

Tỷ lệ nảy mầm giảm mạnh sau 4 tháng ở lớp 1, 2 và bao jumbo (dưới 70%, riêng jumbo chỉ 11%), cho thấy các vị trí này không phù hợp để tồn trữ lúa giống. Ngược lại, lớp 3-5 giữ tỷ lệ cao. Sau 6 tháng, lớp 3-5 vẫn đạt ~98%, trong khi các vị trí còn lại chỉ còn 0,33-28,3%. Điều này khẳng định lưu trữ ở lớp 3-5 trong thùng chứa thông thoáng lạnh là hiệu quả nhất để bảo quản lúa giống.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu cho thấy bảo quản lúa bằng phương pháp thông thoáng lạnh trong thùng chứa giúp giảm thất thoát về số lượng và chất lượng so với bảo quản bằng bao jumbo. Phương pháp này duy trì tốt tỷ lệ nảy mầm, phù hợp cho lưu trữ hạt giống. Trong khi các giải pháp bảo quản thông thường làm tăng ẩm độ hạt, thì thùng chứa thông thoáng lạnh giúp giữ ẩm ổn định và thậm chí có xu hướng giảm, góp phần bảo đảm chất lượng lúa trong suốt quá trình tồn trữ.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí



nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **08/7/2025**

Ngày phản biện: **22/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Châu Tấn Phát, Trương Công Sơn, Dương Văn Thắng, Đặng Vũ Bảo, Lê Minh Hiếu, Lê Phú Cường, và Phan Thị Kim Yến, “Nghiên cứu một số phương pháp xử lý hạt trước bảo quản ảnh hưởng đến chất lượng hạt giống lúa (*Oryza sativa* L.)”. Tạp chí Khoa học Đại học Văn Lang, vol. 7, no. 39(3), pp. 94-100, 2023.
- [2]. Huỳnh Kỳ và Nguyễn Thành Tâm, “Quy trình phân tích tình trạng chất lượng lúa bằng phương pháp sinh học phân tử và sinh hóa”. NXB. Đại học Cần Thơ, 2021.
- [3]. IRRI, “*Standard Evaluation System for Rice (5th ed.)*”. International Rice Research Institute, 2014.
- [4]. Nguyễn Thành Tâm, Nguyễn Hồng Huế, Nguyễn Văn Chánh, và Kim Thị Huyền Trân, “Ảnh hưởng của mùa vụ và thời điểm thu hoạch đến đặc tính nông học, thành phần năng suất và phẩm chất của giống lúa IR50404”. Tạp chí Khoa học Quốc tế AGU, vol. 24, pp. 47-58, 2020.
- [5]. Nguyễn Văn Cương và Nguyễn Hoài Tân, “Tính toán thiết kế thùng chứa tồn trữ cám viên năng suất 500 tấn”. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, vol. 30, pp. 30-38, 2014.
- [6]. Phan Văn Thơm, “Những mất mát lương thực trong quá trình thu hoạch và tồn trữ”. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, vol. 25, pp. 75-77, 2013.
- [7]. Sarawadee Wongdechsaekul và Jirasak Kongkiattikajorn, “Storage time affects storage proteins and volatile compounds, and pasting behavior of milled rice”. KKU Research Journal, vol. 15, pp. 852-862, 2010.

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀ MRAC CHO HỆ THỐNG WATERJET TRONG USVs CỨU HỘ

DESIGN PID AND MRAC CONTROLLER FOR WATERJET PROPULSION IN USVs RESCUE

Hồ Lê Khánh Dy¹, Nguyễn Hữu Cường Thịnh¹, Phan Hoàng Long^{1,2,3},
Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế và so sánh hai bộ điều khiển PID và MRAC điều khiển lực đẩy cho hệ thống waterjet dùng trong phương tiện cứu hộ không người lái (USVs). Hàm truyền được xác định thực nghiệm làm cơ sở thiết kế. Kết quả cho thấy PID đơn giản nhưng bị ảnh hưởng bởi nhiễu và thay đổi tham số, trong khi MRAC có khả năng thích nghi tốt hơn.

Từ khóa: PID; MRAC; Thrust controller; Waterjet propulsion.

ABSTRACT

This paper presents the design and comparison of two controllers - PID and MRAC - for thrust control in a waterjet system used in unmanned surface vehicles (USVs) for rescue missions. The system's transfer function is experimentally identified and used as the basis for controller design. Results show that while PID is simple, it is sensitive to noise and parameter variations, whereas MRAC demonstrates better adaptability.

Keywords: PID; MRAC; Thrust controller; Waterjet propulsion.

1. TỔNG QUAN

Đuối nước là một trong những nguyên nhân gây chết người hàng đầu. Theo như Tổ chức Y tế Thế giới WHO, tỉ lệ tử vong do đuối nước chiếm 7% tổng số ca tử vong trên toàn thế giới năm 2011 [1]. Tại Việt Nam, tình hình đuối nước đang ở mức báo động. Theo như thống kê của Bộ Y tế năm 2022, có gần 2000 ca tử vong

do đuối nước ở trẻ em dưới 16 tuổi [2]. Trong bối cảnh đó, việc cứu người là nhiệm vụ quan trọng và phụ thuộc rất lớn vào thời gian cứu nạn.

Các phương pháp cứu người như bơi hay dùng thuyền, thường gặp nhiều hạn chế do chậm tiếp cận nạn nhân và bị ảnh hưởng bởi thời tiết. Để khắc phục, nhiều nghiên cứu tập trung vào phát triển các thiết bị cứu người, 

trong đó có các phương tiện không người lái (USVs) được thiết kế riêng để thực hiện nhiệm vụ cứu hộ [3], [4].

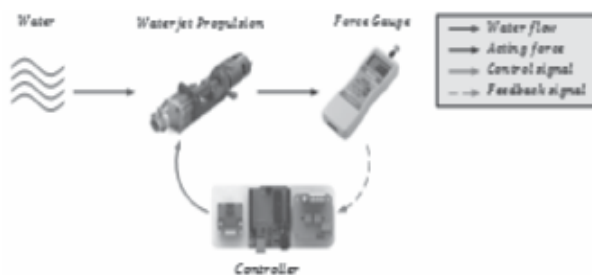
Hệ thống đẩy nước (waterjet propulsion) đã trở thành một lựa chọn lý tưởng cho các USVs cứu hộ. So với các hệ thống cánh quạt (propeller), waterjet mang lại nhiều ưu điểm nhờ vào khả năng cơ động tốt trong vùng nước nông, nhiều vật cản [5]. Điều này giúp tiếp cận nạn nhân nhanh hơn và hiệu quả trong các tình huống khẩn cấp.

Hiện nay có nhiều nghiên cứu về hệ thống waterjet, chủ yếu tập trung vào tối ưu biên dạng để tăng hiệu suất hoạt động và tối ưu thuật toán điều khiển [6], [7], [8], [9]. Tuy nhiên chưa có nhiều tài liệu nghiên cứu về điều khiển lực đẩy của hệ thống waterjet. Đây là bài toán quan trọng vì điều khiển lực đẩy có ảnh hưởng tới việc điều khiển vận tốc và hướng đi của con tàu [10].

Do đó, mục tiêu nghiên cứu của bài báo này là thiết kế bộ điều khiển lực đẩy cho hệ thống waterjet, cụ thể sẽ thiết kế và thực nghiệm bộ điều khiển PID, đồng thời sẽ kiểm chứng tính khả thi của bộ điều khiển MRAC bằng mô phỏng.

2. PHƯƠNG ÁN

1) Tổng quan về hệ thống



Hình 1. Cấu trúc mạch của hệ thống waterjet

Hình 1 mô tả tổng quan hệ thống đo lực đẩy của waterjet. Trong hệ thống này, nước được hút vào bên trong waterjet và sau đó phun ra phía sau với vận tốc cao. Phản lực từ dòng nước này tạo lực đẩy lên thân tàu, giúp tàu di chuyển về phía trước. Đồng thời, lực đẩy này tác động lên máy đo lực được đặt phía trước, cho phép đo lường chính xác lực đẩy do waterjet tạo ra.

2) Phương pháp

Nghiên cứu này sử dụng bộ PID nhằm kiểm soát lực đẩy trong quá trình vận hành. Quá trình thiết kế PID chỉ yêu cầu ba tham số cơ bản: P, I, D giúp việc thiết kế dễ dàng, tiết kiệm thời gian và nguồn lực cũng như dễ dàng áp dụng cho nhiều loại hệ thống [11].

Bộ điều khiển thích nghi theo mô hình tham chiếu (MRAC) cũng được sử dụng do phù hợp với các hệ phi tuyến nhờ khả năng điều chỉnh các tham số điều khiển để phù hợp với môi trường hoạt động theo thời gian thực [12].

Nghiên cứu này sẽ sử dụng mô hình tham chiếu được suy ra từ thực nghiệm PID thay vì tối ưu từ ban đầu nhằm giảm độ khó bài nghiên cứu, giúp đơn giản hóa quy trình thiết kế và tạo được cơ sở để so sánh công bằng giữa PID và MRAC.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

1) Bộ điều khiển PID

Để đánh giá thiết kế, lấy yêu cầu bộ điều khiển PID: $OS \leq 10\%$, $t_s \leq 5s$, và $e_{ss} \leq 5\%$. Hàm truyền của hệ thống waterjet được tìm ra bằng data thực nghiệm với input là 100PWM, output là lực đẩy và đồng thời sử dụng lệnh System Identification trong Matlab. Dưới đây là hàm truyền của hệ thống:

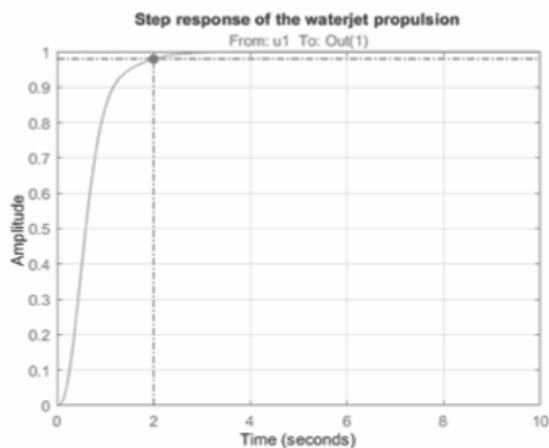
$$(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{0.0003268}{s^2 + 0.08204s + 0.003911} \quad (1)$$

Với: $Q(s)$ – Lực đẩy của waterjet; $U(s)$ – Xung (PWM) cấp vào driver.

Hệ số PID sau khi tuning, sử dụng PID tuner trong Matlab:

Bảng 1. Hệ số I

K_i	12.5
Settling time	2.01s
Overshoot	0%
Steady state error	0.001%



Hình 2. Đồ thị mô phỏng đáp ứng của bộ điều khiển

2) Bộ điều khiển MRAC

Bộ điều khiển MRAC giúp hệ waterjet bám sát đầu ra tham chiếu mong muốn trong điều kiện có nhiễu hoặc biến động tham số. Bộ MRAC lấy mô hình tham chiếu lý tưởng (Model Reference) và các luật thích nghi (Adaptive law) để điều chỉnh liên tục tham số

điều khiển, giảm thiểu sai số giữa hệ thống thực tế và mô hình tham chiếu.

* Mô hình tham chiếu (reference model)

Mô hình động lực học tham chiếu được suy ra từ (1):

$$\ddot{x}_{ref} + 0.08204\dot{x}_{ref} + 0.003911x_{ref} = 0.0003268u \quad (2)$$

Với: $\ddot{x}_{ref}$, $\dot{x}_{ref}$, và x_{ref} - Gia tốc, vận tốc, và chuyển vị của khối nước trong waterjet; m_{ref} - Hệ số quán tính tham chiếu; c_{ref} - Hệ số cản tham chiếu; k_{ref} - Hệ số độ cứng tham chiếu; và f_{ref} - Hệ số giữa tín hiệu PWM và lực đẩy.

* Mô hình thực tế (actual model)

Mô hình hệ thống thực tế có dạng động lực học:

$$(m_{ref} + rdm)\ddot{x} + (c_{ref} + rdm)\dot{x} + (k_{ref} + rdm)x = u \quad (3)$$

Với: $\ddot{x}$ - Gia tốc của lực đẩy thực tế; $\dot{x}$ - Vận tốc của lực đẩy thực tế; x - Lực đẩy thực tế; rdm - Biến số ngẫu nhiên (-1, +1).

Sai số giữa hệ thống thực tế và mô hình tham chiếu:

$$e = x - x_{ref} \quad (4)$$

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_{ref} \quad (5)$$

Với: e , $\dot{e}$ - Sai số và đạo hàm sai số.



* Bề mặt trượt

Bề mặt trượt được định nghĩa:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (6)$$

* Luật điều khiển

Luật điều khiển MRAC được thiết kế để giảm thiểu sai số e và bề mặt trượt s , đảm bảo đầu ra hệ thống thực tế bám theo mô hình tham chiếu:

$$\hat{m} = -\gamma_m s \ddot{x}_{ref} \quad (7)$$

$$\hat{c} = -\gamma_c s \dot{x}_{ref} \quad (8)$$

$$\hat{k} = -\gamma_k s x_{ref} \quad (9)$$

Với: $\hat{m}$ – Ước lượng khối lượng quán tính; $\hat{c}$ – Lực cản ước lượng; $\hat{k}$ – Độ cứng ước lượng; và $\gamma_m, \gamma_c, \gamma_k$ – Các hệ số tương ứng với m, c , và k .

* Phương trình tín hiệu điều khiển

$$u(t) = \hat{m}[\ddot{x}_{ref}(t) - 2\lambda\dot{e}(t) - \lambda^2 e(t)] \quad (10)$$

$$s + \hat{c}\dot{x}_{ref}(t) + \hat{k}x_{ref}(t) \quad (11)$$

4. KẾT QUẢ

1) Thực nghiệm bộ điều khiển PID

Thực nghiệm bộ điều khiển PID được thực hiện ở trên hồ bơi di động với kích thước $4 \times 2 \times 1$ (m).

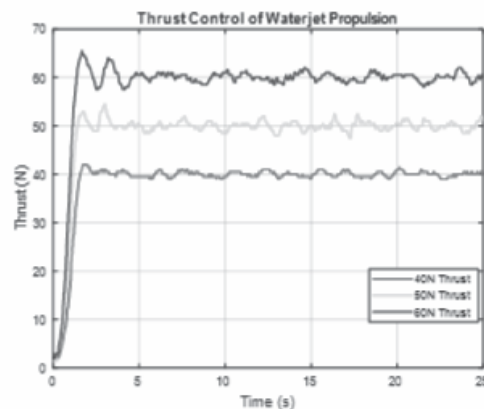


Hình 3. Thực nghiệm đo lực đẩy của hệ thống waterjet

Waterjet được sử dụng đường kính đầu phun (Nozzle) 30mm, động cơ DC 775 công suất 0.15kW, tốc độ định danh 12000RPM. Động cơ đạt gần tốc độ định danh và lực đẩy tối đa xấp xỉ 78N. Do đó, nghiên cứu này sẽ thực nghiệm với ba mức lực 40N, 50N và 60N, mỗi mức 25s, nghỉ 5' để mặt nước ổn định trước khi tiếp tục. Bảng 2 và Hình 4 mô tả mối quan hệ giữa lực đẩy và thời gian trong thực nghiệm.

Bảng 2. Đáp ứng hệ thống PID cho các mức lực đẩy khác nhau

	40N	50N	60N
Settling time, s	1.46	3.11	3.46
Overshoot, %	5	9	9.17
Steady-State Error, %	0.1	2	0.83

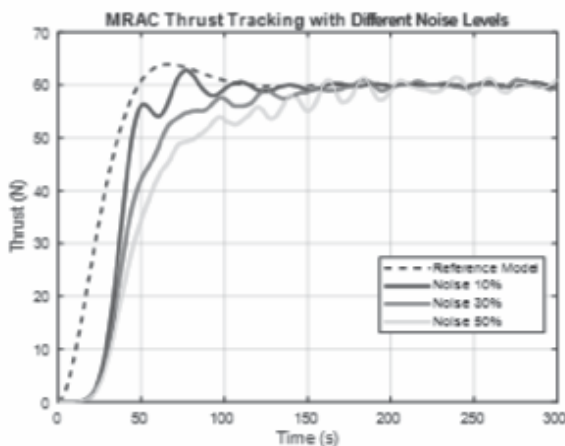


Hình 4. Đồ thị PID giữa lực đẩy và thời gian

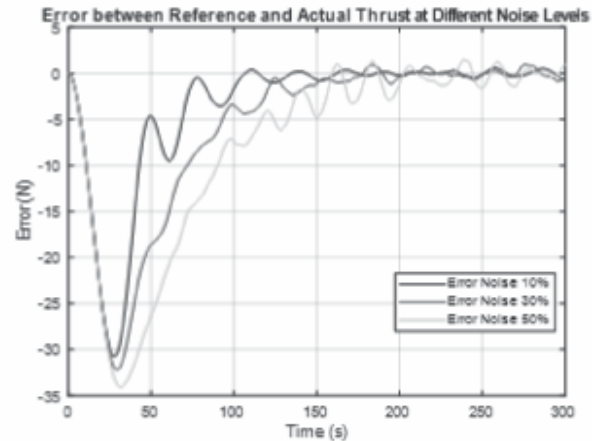
Bộ PID chỉ sử dụng hệ số K_I để hạn chế vọt lố trong lý thuyết nhưng thực nghiệm vẫn ghi nhận vọt lố ở mức từ 8.75% đến 9.17% do có sóng dội lại, tác động vào máy đo lực. Dù vậy, PID vẫn đáp ứng tốt các mục tiêu thiết kế, với thời gian ổn định dưới 5s, độ vọt lố dưới 10%, và sai số trạng thái ổn định nhỏ hơn 5%.

2) Mô phỏng bộ điều khiển MRAC

Tuy PID hiệu quả trong điều kiện môi trường ổn định nhưng hạn chế khi động học hệ thống hoặc điều kiện môi trường thay đổi. Do đó, phương pháp điều khiển MRAC được đề xuất nhờ khả năng tự điều chỉnh tham số để bám sát tham chiếu và thích nghi tốt hơn trong các điều kiện thay đổi. Bảng 3 mô tả đáp ứng và đồ thị mô phỏng của MRAC với mức lực 60N và được mô phỏng với 3 mức nhiễu: 10%, 30%, 50%.



Hình 5. Đồ thị MRAC giữa lực đẩy và thời gian với mức nhiễu 10%, 30%, 50%



Hình 6. Đồ thị sai số của lực đẩy giữa mô hình tham chiếu và mô hình thực tế

Bảng 3. Đáp ứng hệ thống MRAC cho các mức lực đẩy khác nhau

Noise	10%	30%	50%
Settling time, s	125.62	150.44	270.92
Overshoot, %	4.68	1.64	2.46
Steady-State Error, %	1.2	0.83	1.59

MRAC bám sát tham chiếu (Model Reference) rất tốt, với sai số ổn định xấp xỉ 1.6% và độ vọt lố nhỏ, dao động từ 1.64% đến 4.68% so với PID ở các trường hợp nhiễu 10%, 30% và 50%. Tuy nhiên, thời gian ổn định của MRAC lại rất lâu (~270s) so với PID (1-3s), điều này cho thấy mô hình tham chiếu được thiết kế chưa phù hợp. Các tham số m_{ref} , c_{ref} , k_{ref} khiến tín hiệu tham chiếu đáp ứng chậm, ảnh hưởng tới hệ thống. Do đó cần phải tối ưu mô hình tham chiếu để tối ưu hóa việc thích nghi theo mức lực đẩy để rút ngắn thời gian đáp ứng và nâng cao hiệu suất toàn hệ thống.

5. KẾT LUẬN

Bài nghiên cứu này đề xuất phương pháp sử dụng bộ PID để điều khiển lực đẩy cho

hệ waterjet, đồng thời kiểm chứng bộ MRAC qua mô phỏng.

Bộ điều khiển PID đạt được các mục tiêu đã đề ra nhưng bị nhiễu do sóng va vào thành bể và dội lại trong lúc thực nghiệm. Vì vậy, cần sử dụng bể bơi triệt sóng để giảm nhiễu.

Bộ điều khiển MRAC cho thấy khả năng bám mô hình tham chiếu tốt với các sai số thấp. Tuy nhiên, thời gian xác lập rất lâu do chưa tối ưu được mô hình tham chiếu. Vì vậy, nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung tối ưu mô hình tham chiếu và thực nghiệm bộ MRAC để đánh giá hiệu quả thực tế.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **08/7/2025**

Ngày phản biện: **23/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. World Health Organization: WHO, “Drowning”, Accessed: Nov. 07, 2024. [Online] Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drowning>
- [2]. Bộ Y tế - Phòng chống tai nạn thương tích, “Đuối nước khiến gần 2.000 trẻ em Việt Nam dưới 16 tuổi tử vong mỗi năm”. Accessed: Nov. 07, 2024. [Online] Available: https://moh.gov.vn/web/phong-chong-tai-nan-thuong-tich/tin-noi-bat/-/asset_publisher/iinMRn208ZoI/content/-uoi-nuoc-khien-gan-2-000-tre-em-viet-nam-duoi-16-tuoi-tu-vong-moi-nam?inheritRedirect=false
- [3]. C. Seguin, G. Blaquière, A. Loundou, P. Michelet, and T. Markarian, “Unmanned aerial vehicles (drones) to prevent drowning”. Resuscitation, vol. 127, pp. 63-67, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.resuscitation.2018.04.005.
- [4]. D. Yang, Y. Cao, Y. Feng, X. Lai, and Z. Pan, “Drowning Detection Algorithm for Intelligent Lifebuoy”. In: Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems, ICUS 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 512-519. doi: 10.1109/ICUS52573.2021.9641291.
- [5]. K. Alexander, “Waterjet versus Propeller Engine Matching Characteristics”. Naval Engineers Journal, vol. 107, no. 3, pp. 129-139, 1995, doi: 10.1111/j.1559-3584.1995.tb03041.x.
- [6]. Y. sheng Yang, Y. chun Xie, and S. lin Nie, “Nozzle optimization for water jet propulsion with a positive displacement pump”. China Ocean Engineering, vol. 28, no. 3, pp. 409-419, 2014, doi: 10.1007/s13344-014-0033-4.
- [7]. W. Jiao, L. Cheng, D. Zhang, B. Zhang, Y. Su, and C. Wang, “Optimal Design of Inlet Passage for Waterjet Propulsion System Based on Flow and Geometric Parameters”. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/2320981.
- [8]. C. Wang et al., “Numerical simulation on hydraulic characteristics of nozzle in waterjet propulsion system”. Processes, vol. 7, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.3390/PR7120915.
- [9]. E.K. Loghis and N. I. Xiros, “Development of Discrete-Time Waterjet Control Systems Used in Surface Vehicle Thrust Vectoring”. J Mar Sci Eng, vol. 10, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/jmse10121844.
- [10]. “Numerical analysis of a waterjet propulsion system”, 2006, doi: 10.6100/IR614907.
- [11]. R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, “A review of PID control, tuning methods and applications”. Int J Dyn Control, vol. 9, no. 2, pp. 818-827, Jun. 2021, doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.
- [12]. J. Chen, J. Wang, and W. Wang, “Robust adaptive control for nonlinear aircraft system with uncertainties”. Applied Sciences (Switzerland), vol. 10, no. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/app10124270.

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN HIỆU SUẤT CỦA LOA GIẢM GIẬT TRÊN SÚNG ĐẠI LIÊN SĐL-M24

MATH RESEARCH ON THE PERFORMANCE OF RECEPTION SPEAKER ON
SĐL-M24 MACHINE GUN

KS. Nguyễn Hoàng Phú¹, ThS. Mai Văn An², ThS. Tạ Bá Dũng²

¹Nhà máy Z111, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

²Viện Vũ khí, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

TÓM TẮT

Súng đại liên SĐL-M24 được thiết kế theo nguyên lý trích khí, pitong lùi dài khóa nòng mở. Theo đó, khóa nòng là khâu cơ sở của máy tự động khi bắn. Súng có hỏa lực mạnh nhằm chế áp đối phương bằng tốc độ bắn lớn, năng lượng đầu đạn cao nên cần được thiết kế cơ cấu giảm lực giật khi bắn. Nghiên cứu trình bày thứ tự các bước thành lập các phương trình tính toán động lực học cho thiết bị đầu nòng kiểu loa va đập kết hợp lỗ nghiêng nhằm giảm lực giật khi bắn. Kết quả của nghiên cứu này có thể áp dụng cho việc tính toán thiết kế các loại loa đầu nòng có kết cấu tương tự.

Từ khóa: Súng đại liên; Loa giảm giật; Hiệu suất loa giảm giật.

ABSTRACT

The SĐL-M24 machine gun is designed according to the principle of gas extraction, the long piston recoils the rotating barrel lock. Accordingly, the barrel lock is the basic link of the automatic machine when firing. The gun has strong firepower to suppress the enemy with high rate of fire, high bullet energy, so it needs to be designed with a mechanism to reduce recoil when firing. The study presents the order of steps to establish dynamic calculation equations for the muzzle device of the impact speaker type combined with inclined holes to reduce recoil when firing. The results of this study can be applied to the calculation and design of muzzle speakers with similar structures.

Keywords: Machine gun; Recoil suppressor; Recoil suppressor performance.

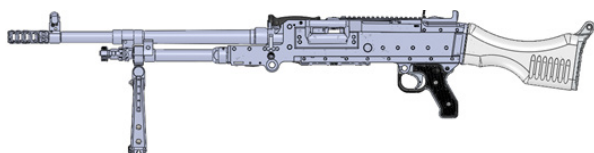


1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Súng đại liên SDL-M24 là loại súng trang bị cho cá nhân, tổ bộ binh để tiêu diệt sinh lực địch tập trung, bắn chế áp hỏa lực đối phương, chỉ viện cho bộ binh chiến đấu trong cự ly 1800m. Súng dùng đạn $7,62 \times 51\text{mm}$, sử dụng chế độ bắn liên thanh. Súng hoạt động theo nguyên lý trích khí. Khi bắn, cụm khóa nòng là khâu cơ sở nhận năng lượng từ áp suất khí thuốc tác dụng vào đầu pittong truyền chuyển động cho toàn bộ cơ cấu của súng hoạt động. Do súng sử dụng đạn có năng lượng lớn, tốc độ bắn nhanh nên cần có cơ cấu đầu nòng giảm lực giật của súng khi bắn.

2. BÀI TOÁN ĐỘNG LỰC HỌC THIẾT BỊ GIẢM GIẬT ĐẦU NÒNG

2.1. Cấu tạo thiết bị giảm giật đầu nòng súng đại liên SDL-M24



Hình 1. Súng đại liên SDL-M24



Hình 2. Cấu tạo loa giảm giật đầu nòng trên súng đại liên SDL-M24

Loa giảm giật súng đại liên SDL-M24 được chế tạo theo nguyên lý va đập kết hợp lỗ phụt nghiêng như trên hình 2.

Loa giảm giật đầu nòng tuy có kết cấu đơn giản nhưng quá trình xảy ra trong nó rất phức tạp. Theo [2], các yếu tố kết cấu ảnh hưởng cơ bản tới hiệu quả của loa giảm giật như sau:

- Lỗ thoát đầu đạn d_0 : Sự thay đổi kích thước đường kính lỗ thoát đầu đạn d_0 ảnh hưởng rất lớn đến lưu lượng tương đối của dòng khí. Do vậy, nó ảnh hưởng lớn đến hiệu suất của loa giảm giật, thông thường $d_0 = (1,1 \div 1,2)d$, với d là cỡ đạn.

- Số ngăn của loa giảm giật: Mục đích của việc sử dụng loa giảm giật nhiều ngăn là để lợi dụng triệt để dòng khí phụt qua lỗ thoát đầu đạn của các ngăn trước sang ngăn sau nhằm nâng cao hiệu suất.

- Diện tích lỗ phụt khí F_c : Diện tích lỗ phụt khí trong các ngăn của loa giảm giật đảm bảo cho dòng khí sau khi va đập vào thành chắn của loa giảm giật được thoát ra và chuyển hướng phụt về phía sau một cách dễ dàng.

- Góc nghiêng lỗ phụt khí ψ : Góc nghiêng lỗ phụt khí ψ là thông số chủ yếu quyết định hướng phụt về sau của dòng khí, đồng thời quyết định động lượng phản tác dụng của dòng khí trên hình chiếu trục nòng. Chính vì vậy, góc nghiêng lỗ phụt khí ảnh hưởng lớn đến hiệu suất của loa giảm giật.

2.2. Bài toán động lực học loa giảm giật đầu nòng

Với giả thiết dòng khí ở trạng thái tới hạn và đẳng entrôpi, các phương trình tính toán các tham số đặc trưng của loa giảm giật đầu nòng được xác định như sau [2]:

a) Hệ số đặc trưng kết cấu α

Hệ số đặc trưng kết cấu α quan hệ với kích thước và hình dạng của loa theo công thức:

$$\alpha = \overline{K}_B \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n + \sum_{i=1}^n \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_{i-1} (1 - \sigma_i) \overline{K}_i \xi_i \cos \psi_i \quad (1.1)$$

Trong đó:

$$\bar{K}_B = \frac{K_B}{k}, \quad \bar{K}_i = \frac{K_i}{k} \quad \text{Các đại lượng tương}$$

đối của hệ số phản lực. $K_B \approx 1$, do lòng loa không mở rộng đột ngột; $K_i = 1$, do lỗ phụt khí thẳng đều, không mở rộng;

n - Số ngăn của loa giảm giạt;

ψ_i - Góc nghiêng của lỗ phụt khí ngăn thứ i ;

ξ_i - Hệ số tính đến hiệu quả dẫn khí trong mặt nghiêng, đại lượng ξ_i , có ảnh hưởng rất nhiều đến giá trị α và ΔE . Theo [1], [2], ξ_i được xác định theo công thức:

$$\xi_i = \frac{\cos(\psi_i^1 + \Delta\psi_i^1)}{\cos\psi_i^1 \cos\Delta\psi_i^1} \quad (1.2)$$

Trong đó:

ψ_i^1 - Góc nghiêng mặt vát của lỗ phụt khí ngăn thứ i ;

$\Delta\psi_i^1$ - Góc giữa pháp tuyến của mặt vát lỗ phụt khí và trục tâm lỗ phụt khí. Giá trị $\Delta\psi_i^1$ phụ thuộc vào ψ_i^1 và được xác định theo bảng (đồ thị) trong [1].

σ_i - Tỷ lệ lượng khí trong dòng chính của ngăn thứ i , σ_i được xác định theo công thức:

$$\sigma_i = \frac{1}{1 + \frac{F_{ci}}{F_{oi}} \frac{1}{1 + k(1 - \cos\psi_i)}} \quad (1.3)$$

Ở đây:

F_{ci} - Diện tích tiết diện ngang lỗ phụt của ngăn thứ i ;

F_{oi} - Diện tích tiết diện ngang lỗ thoát đầu đạn qua ngăn thứ i .

Đối với loa giảm giạt của súng đại liên SĐL-M24, do hình dạng và kích thước của lỗ phụt bên các ngăn của loa giảm giạt như nhau,

nên $\sigma_i = \sigma$; $\psi_i = \psi$; $\bar{K}_i = \bar{K}_G$; $\xi_i = \xi$, nên phương trình xác định α (1.1) được viết lại theo công thức:

$$\alpha = \bar{K}_B \sigma^n + \sum_{i=1}^n \bar{K}_G \xi (1 - \sigma^n) \cos\psi \quad (1.4)$$

b) Hiệu suất năng lượng ΔE

Hiệu suất năng lượng ΔE của loa giảm giạt là hệ số đặc trưng cho độ giảm tương đối động năng do có loa giảm giạt. Nó được xác định bằng công thức [1], [2]:

$$\Delta E = \frac{Q_0}{Q_{0H}} \left(\frac{1 + \alpha \beta \frac{\omega}{q}}{1 + \beta \frac{\omega}{q}} \right)^2 - 1 \quad (1.5)$$

c) Hiệu suất xung lượng ΔJ

Hiệu suất xung lượng ΔJ là hệ số đặc trưng cho độ giảm tương đối của xung lượng khối lùn. Nó được xác định đặc trưng xung lượng ΔJ :

$$\Delta J = (\alpha - 1) \frac{\beta \frac{\omega}{q}}{1 + \beta \frac{\omega}{q}} \quad (1.6)$$

Như vậy, ΔE và ΔJ là các đại lượng đặc trưng cho sự biến thiên tương đối của động năng lùn tự do của thân súng và xung lượng tăng lùn (tác dụng lên đáy nòng) trong thời gian tác động của thiết bị đầu nòng.

Khi $\alpha < 1$, giá trị ΔE và ΔJ có dấu âm. Dấu âm thể hiện sự giảm động năng của khối lùn hoặc giảm xung lượng của phát bắn, do thiết bị đầu nòng gây ra.



Khi tăng lên ($\alpha \geq 1$), các giá trị ΔE và ΔJ lớn hơn không và đặc trưng cho việc tăng động năng của khối lùn hoặc tăng xung lượng của phát bắn. Thông thường ΔE và ΔJ viết dưới dạng %.

Giữa ΔE và ΔJ có mối quan hệ sau:

$$\Delta J = \sqrt{1 + \frac{Q_{0H}}{Q_0} \Delta E} - 1 \quad (1.7)$$

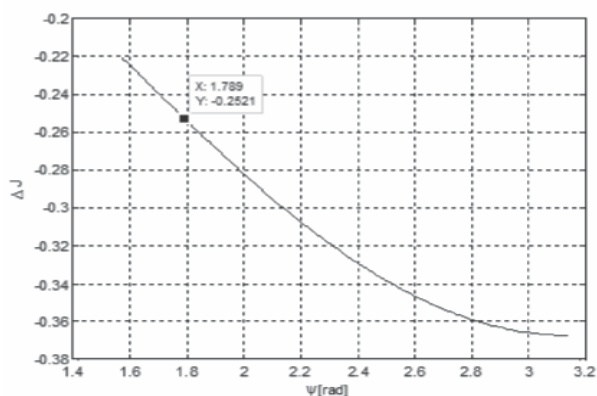
Từ thông số kết cấu loa giảm giật súng đại liên SĐL-M24, ta có bản các số liệu đầu vào cho bài toán tính toán hiệu suất loa như bảng 1:

Bảng 1. Các số liệu đầu vào cho bài toán tính toán hiệu suất loa

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Vận tốc đầu nòng của đầu đạn	v_0	842	m/s
2	Trọng lượng thân súng có loa giảm giật	Q_{0H}	12,5	kg
3	Trọng lượng thân súng không có loa giảm giật	Q_0	12,35	kg
4	Trọng lượng thuốc phóng	ω	0,0021	kg
5	Trọng lượng đầu đạn	q	0,0109	kg
6	Đường kính lỗ thoát đạn	d_0	0,0185	m
7	Số ngăn của loa giảm giật	n	4	-
8	Góc nghiêng của lỗ phụt	ψ	80	độ (°)
9	Diện tích lỗ phụt khí	F_{ci}	$0,198 \cdot 10^{-3}$	m^2
10	Diện tích tiết diện ngang lỗ thoát đầu đạn qua ngăn thứ i	F_{oi}	$0,785 \cdot 10^{-4}$	m^2

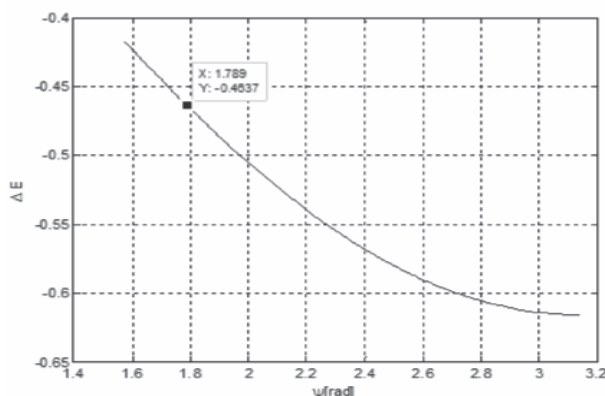
3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

a. Hiệu suất xung lượng ΔJ



Hình 3. Đồ thị biểu diễn mối quan hệ của hiệu suất xung lượng ΔJ vào góc nghiêng lỗ phụt khí thuộc ψ

b. Hiệu suất năng lượng ΔE



Hình 4. Đồ thị biểu diễn mối quan hệ của hiệu suất năng lượng ΔE vào góc nghiêng lỗ phụt khí thuộc ψ

Theo các đồ thị từ hình 3 và hình 4:

+ Hiệu suất xung lượng $\Delta J = - 25,21\%$, tức là xung lực giạt của súng giảm tới 25,21% khi súng lắp loa giảm giạt so với khi súng không lắp loa giảm giạt;

+ Hiệu suất năng lượng $\Delta E = - 46,37\%$, tức là năng lượng lùi của súng giảm tới 46,37% khi súng lắp loa giảm giạt.

4. KẾT LUẬN

Với thiết kế loa giảm giạt bốn ngăn, góc nghiêng lỗ phụt 80° giúp giảm đáng kể lực giạt (25,21%) và năng lượng lùi (46,37%). Thiết kế này góp phần làm tăng độ chính xác khi bắn đồng thời giảm lực tác dụng lên vai xạ thủ.

Nghiên cứu này đã được áp dụng thực tế trong chế tạo súng đại liên SDL-M24 và được đánh giá cao từ đơn vị sử dụng. Vì vậy, các bước nghiên cứu, kết quả này có thể làm tài liệu tham khảo hoặc dẫn chứng cho việc tính toán, thiết kế loa giảm giạt có thiết kế tương tự. ❖

Ngày nhận bài: **06/6/2025**

Ngày phản biện: **16/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Phạm Huy Chương, “*Động lực học vũ khí tự động*”. Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, 2002.
- [2]. Б.В. Орлов (1974), “*Проектирование ракетных и ствольных систем*”. Москва, Машиностроение.

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ TÔI CẬN TỚI HẠN VÀ NHIỆT ĐỘ RAM ĐẾN CƠ TÍNH VÀ TỔ CHỨC TẾ VI CỦA THÉP HỢP KIM THẤP 30CrMnSi CHẾ TẠO TỪ SẮT XỐP

EVALUATION OF EFFECT OF SUBCRITICAL QUENCHING TEMPERATURE AND TEMPERING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF 30CrMnSi LOW-ALLOY STEEL MADE FROM SPONGE IRON

Phùng Tuấn Anh^{1,*}, Trần Văn Chiến², Nguyễn Trường An¹, Bùi Công Đoàn³

¹Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

²Viện Kỹ thuật Cơ giới quân sự, Tổng cục Hậu cần – Kỹ thuật

³Cục Kỹ thuật, Quân chủng Phòng không – Không quân

*Email: phungtuuananhmta@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ tôi ở các vùng nhiệt độ khác nhau, bao gồm cả vùng nhiệt độ cận tới hạn và nhiệt độ ram đến tổ chức và cơ tính của thép hợp kim thấp 30CrMnSi được chế tạo từ sắt xốp. Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra rằng, nhiệt độ tôi và ram ảnh hưởng rất lớn đến tính chất của thép 30CrMnSi. Khi tôi ở nhiệt độ cận tới hạn (trong vùng Ac_1 đến Ac_3) từ (800-820)°C, tổ chức thu được sau tôi gồm martenxit và austenit dư và lượng ferit không chuyển biến, quá trình ram tiếp theo cho độ bền không cao nhưng độ dẻo dai tốt hơn so với khi tôi ở vùng nhiệt độ trên Ac_3 (840-880)°C, do sau tôi chỉ gồm martenxit và austenit dư và không còn ferit. Với cùng nhiệt độ tôi, khi tăng nhiệt độ ram, độ bền sẽ giảm xuống và ở 600°C, thép có độ dẻo dai cao nhất, độ bền thấp nhất. Tăng nhiệt độ tôi lên trên 900°C, hạt austenit có xu hướng thô to, không thích hợp để xử lý nhiệt cho các chi tiết kết cấu. Khi ram ở nhiệt độ trên 600°C, độ bền của thép giảm nhanh, không đáp ứng yêu cầu làm việc của chi tiết kết cấu. Các kết quả nghiên cứu này góp phần làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm cải thiện các tính chất của thép chế tạo từ sắt xốp trong sản xuất thực tiễn ở Việt Nam.

Từ khóa: Sắt xốp; Thép 30CrMnSi; Nhiệt độ tôi cận tới hạn; Nhiệt độ ram; Cơ tính; Tổ chức tế vi.

ABSTRACT

This paper presents the research results on the effects of quenching temperatures (including subcritical temperatures) and tempering temperatures on the microstructure and mechanical properties of low-alloy steel 30CrMnSi made from sponge iron. Experimental results show that quenching and tempering temperatures significantly affect on the properties of 30CrMnSi steel. At a subcritical quenching temperature of (800-820)°C, the microstructure after quenching still contains

a small amount of ferrite, and the tempering process results in lower strength but better toughness compared to quenching at A_{c3} higher temperature (840-880)°C (only austenite phase zone), because of no ferrite remains after quenching. At the same quenching temperature, increasing the tempering temperature reduces strength, with the highest toughness and lowest strength achieved at 600°C. When tempered above 600°C, the strength of steel decreases rapidly, failing to meet the operational requirements of structural components. These research results is the basis for further studies in order to improve the properties of steel made from sponge iron in practical production in Vietnam.

Keywords: *Sponge iron; 30CrMnSi steel; Subcritical quenching temperature; Tempering temperature; Mechanical properties; Microstructure.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thép hợp kim thấp 30CrMnSi đã được sử dụng rộng rãi trên thế giới bởi bởi cơ tính cao và độ dẻo dai tốt [1, 2]. Thép được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như công nghiệp hóa chất, vũ khí, các chi tiết máy chịu lực, các chi tiết trong thiết bị bay... chẳng hạn như: trục, bánh răng, mặt bích, vỏ máy, cánh máy nén, ròng rọc, các cấu trúc hàn quan trọng hoạt động dưới tải trọng đổi dấu... Công nghệ chế tạo thép 30CrMnSi rất đa dạng, từ nấu luyện truyền thống đến sử dụng sắt xốp, in 3D, phun phủ laser... [3-7]. Thép hợp kim này được nghiên cứu theo nhiều hướng khác nhau, bao gồm xử lý nhiệt thông thường đến xử lý cơ nhiệt

để thay đổi cơ tính, cũng như ứng dụng phun phủ để làm thay đổi tính chất bề mặt [8-11]. Trong những năm gần đây, việc nghiên cứu thép 30CrMnSi bắt đầu phát triển mạnh ở Việt Nam [12-15]. Bài báo này trình bày nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ tôi và ram đến cơ tính và tổ chức tế vi của thép hợp kim thấp 30CrMnSi chế tạo từ sắt xốp.

2. THỰC NGHIỆM

Thép 30CrMnSi thuộc loại thép hợp kim thấp với thành phần hóa học được cho trong bảng 1 (ГОСТ 4543-2016). Thép hợp kim nghiên cứu chế tạo từ sắt xốp có thành phần hóa học được cho trong bảng 2.

Bảng 1. Thành phần hóa học (%) của mác thép 30CrMnSi (ГОСТ 4543-2016)

Mác thép	Thành phần hóa học, % (Khối lượng)								
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe	S	P
30CrMnSi	0,28-0,34	0,90-1,20	0,80-1,10	≤ 0,3	0,8-1,1	≤ 0,3	Còn lại	≤ 0,035	≤ 0,035

Bảng 2. Thành phần hóa học (%) của mác thép 30CrMnSi nghiên cứu

Thành phần hóa học, % (Khối lượng)								
C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe	S	P
0,309	1,038	0,986	0,112	0,987	0,083	96,549	0,021	0,029



Thép 30CrMnSi là thép hợp kim thấp trước cùng tích, cần xác định nhiệt độ tới hạn Ac_1 và Ac_3 để lựa chọn nhiệt độ tôi. Theo một số tài liệu đã công bố với thép hợp kim thấp, nhiệt độ Ac_1 và Ac_3 có thể được tính theo công thức:

1) Kunitake & Katou (1964) [16]:

$$Ac_1 (^\circ C) = 754.83 - 32.25C - 17.76Mn + 23.32Si + 17.3Cr + 4.51Mo + 15.62V.$$

$$Ac_3 (^\circ C) = 920.21 - 394.75C - 14.40Mn + 54.99Si + 5.77Cr + 24.49Mo + 83.37V.$$

2) Kasatkin et al. (1984) [17]:

$$Ac_1 (^\circ C) = 723 - 7.08Mn + 37.7Si + 18.1Cr + 44.2Mo + 8.95Ni + 50.1V + 21.7Al + 3.18W + 297S - 830N - 11.5CSi - 14.0MnSi - 3.10SiCr - 57.9CMo - 15.5MnMo - 5.28CNi$$

$$- 6.0MnNi + 6.77SiNi - 0.80CrNi - 27.4CV + 30.8MoV - 0.84Cr^2 - 3.46Mo^2 - 0.46Ni^2 - 28V^2.$$

$$Ac_3 (^\circ C) = 912 - 370C - 27.4Mn + 27.3Si - 6.35Cr - 32.7Ni + 95.2V + 190Ti + 72Al + 65.6Nb + 5.57W + 332S + 276P + 485N - 900B + 16.2CMn + 32.3CSi + 15.4CCr + 48CNi + 4.32SiCr - 17.3SiMo + 18.6SiNi + 4.8MnNi + 40.5MoV + 174C^2 + 2.46Mn^2 - 6.86Si^2 + 0.322Cr^2 + 9.9Mo^2 + 1.24Ni^2 - 60.2V^2.$$

3) Hougardy (1984) [18]:

$$Ac_1 (^\circ C) = 739 - 22C - 7Mn + 2Si + 14Cr + 13Mo - 13Ni.$$

$$Ac_3 (^\circ C) = 902 - 255C + 19Si - 11Mn - 5Cr + 13Mo - 20Ni + 55V.$$

Nhiệt độ Ac_1 và Ac_3 tính toán cụ thể đối với thép 30CrMnSi được cho trong bảng 3.

Bảng 3. Nhiệt độ Ac_1 và Ac_3 tính toán của thép 30CrMnSi nghiên cứu

Tác giả	Nhiệt độ Ac_1 , $^\circ C$	Nhiệt độ Ac_3 , $^\circ C$
Kunitake & Katou (1964) [16]	~767	~837
Kasatkin et al. (1984) [17]	~734	~832
Hougardy (1984) [18]	~739	~823

Trong khi đó, nhiệt độ Ac_1 và Ac_3 được công bố đối với thép 30CrMnSi theo ГОСТ của Nga thường khoảng $760^\circ C$ và $830^\circ C$, tương ứng [19]. Do vậy, nhiệt độ tôi đối với thép nghiên cứu được lựa chọn trong khoảng 800 đến $880^\circ C$, tức là bao gồm cả nhiệt độ trong vùng cận tới hạn (Ac_1 đến Ac_3) và vùng 1 pha (trên Ac_3).

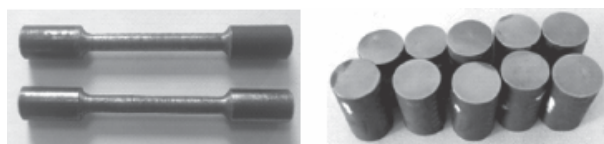
Mẫu thép nghiên cứu được chế tạo từ sắt xốp có dạng hình trụ với đường kính 18 mm. Để đảm bảo sự đồng đều của các mẫu thép trước khi nghiên cứu, tất cả các mẫu được thường hóa sơ bộ bằng cách nung các mẫu ở $880^\circ C$ trong 1h, sau đó lấy ra để nguội trong

không khí tĩnh. Tiếp theo tiến hành tôi và ram ở các nhiệt độ khác nhau, cụ thể:

- Nhiệt độ nung tôi lựa chọn bao gồm vùng cận tới hạn dưới Ac_3 ($800^\circ C$, $820^\circ C$) và vùng trên Ac_3 gồm 840 , 860 và $880^\circ C$ với môi trường nguội là dầu.

- Nhiệt độ ram ngay sau tôi được lựa chọn là 200 , 300 , 400 , 500 và $600^\circ C$. Thời gian ram thông thường được xác định theo thực nghiệm. Để đảm bảo tính đồng đều và dễ dàng so sánh, với đường kính mẫu thử 18 mm, thời gian ram cho tất cả các mẫu sau tôi được lựa chọn là 90 phút [20, 21].

Sau xử lý nhiệt, tiến hành khảo sát cơ tính và tổ chức tế vi của thép. Các mẫu thí nghiệm thử kéo và kiểm tra độ cứng, tổ chức tế vi được cho trên hình 1.

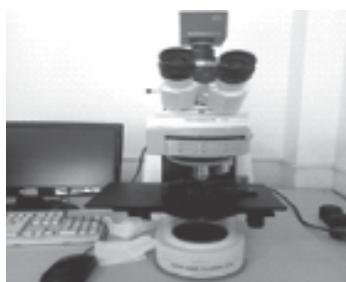


a) b)
Hình 1. Mẫu thử kéo (a) và mẫu kiểm tra tổ chức tế vi (b).

Thiết bị nhiệt luyện tôi và ram NABERTHERM (Đức) (Hình 2), kính hiển vi Axio Imager A2M (Hình 3) để chụp ảnh tổ chức tế vi được tại Phòng Thí nghiệm Vật liệu – Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự. Thí nghiệm thử kéo được thực hiện trên thiết bị thử kéo nén vạn năng TT-HW2-1000 (Canada) đặt tại Trung tâm Đo lường – Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng (Hình 4).



a) b)
Hình 2. Lò nhiệt luyện tôi (a) và ram (b) của hãng Nabertherm.



Hình 3. Kính hiển vi quang học Axio Image A2M.

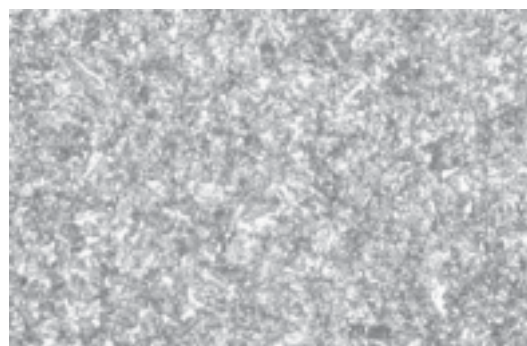


Hình 4. Thiết bị thử kéo nén vạn năng TT-HW2-1000.

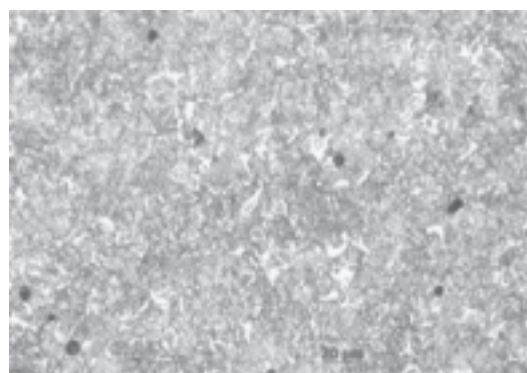
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tổ chức tế vi

Tổ chức tế vi của thép ở các chế độ nhiệt luyện khác nhau được cho trong các hình 5 đến 18.

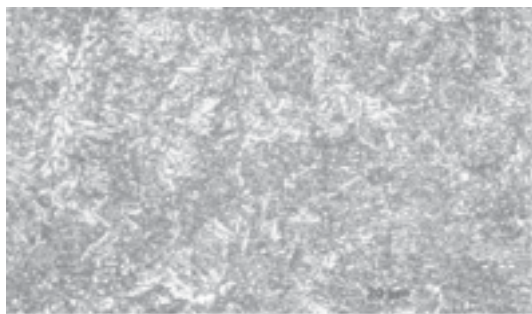


Hình 5. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 800°C và ram ở 400°C/1,5h, x200.

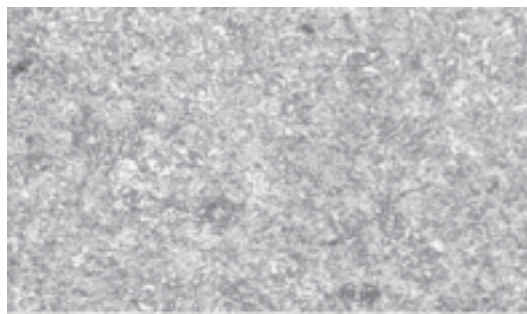


Hình 6. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 820°C và ram ở 400°C/1,5h, x200.

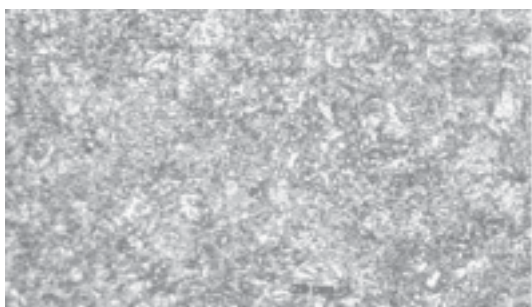




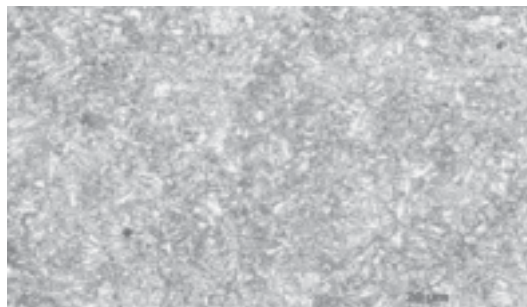
Hình 7. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 840°C và ram ở 200°C/1,5h, x200.



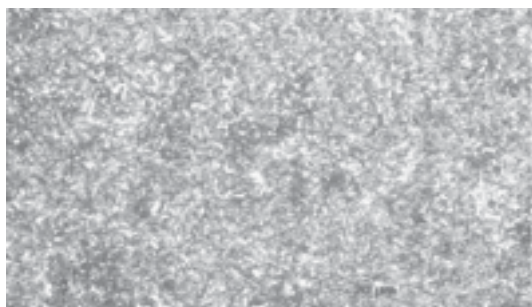
Hình 11. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 860°C và ram ở 200°C/1,5h, x200.



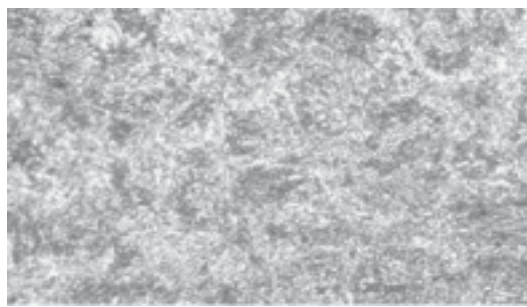
Hình 8. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 840°C và ram ở 400°C/1,5h, x200.



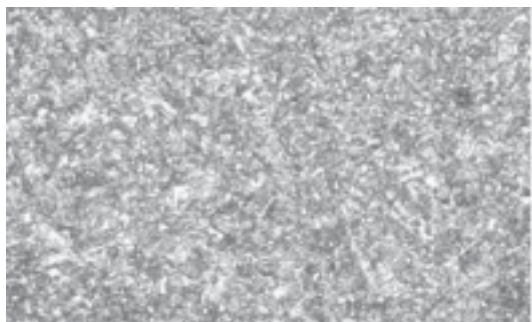
Hình 12. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 860°C và ram ở 400°C/1,5h, x200.



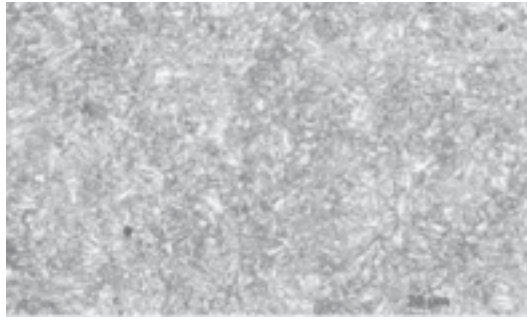
Hình 9. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 840°C và ram ở 500°C/1,5h, x200.



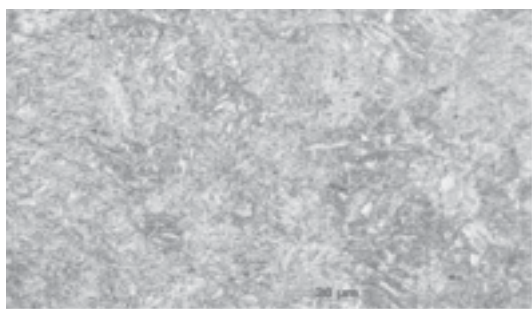
Hình 13. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 860°C và ram ở 600°C/1,5h, x200.



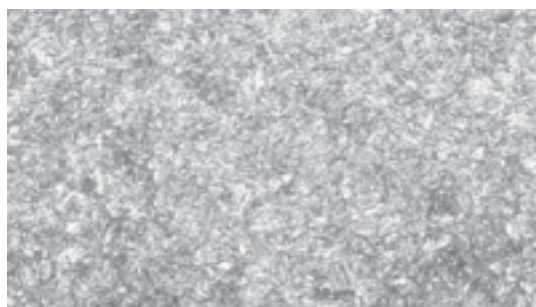
Hình 10. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 840°C và ram ở 600°C/1,5h, x200.



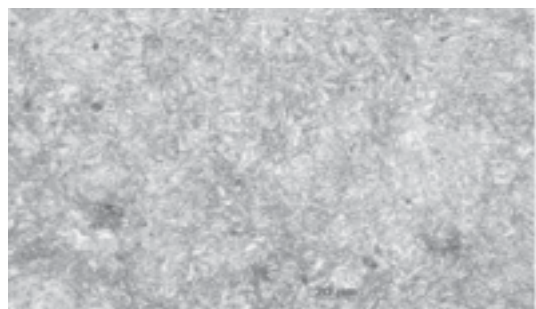
Hình 14. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 880°C và ram ở 200°C/1,5h, x200.



Hình 15. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 880°C và ram ở 400°C/1,5h, x200.



Hình 16. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 880°C và ram ở 500°C/1,5h, x200.



Hình 17. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 900°C và ram ở 200°C/1,5h, x200.



Hình 18. Tổ chức của thép 30CrMnSi sau tôi ở 900°C và ram ở 400°C/1,5h, x200.

Từ các ảnh tổ chức tế vi có thể thấy, khi nung tôi ở vùng nhiệt cận tới hạn 800-820°C (trong vùng nhiệt độ giữa Ac_1 và Ac_3), tổ chức tế vi thu được nằm trong vùng hỗn hợp hai pha austenit và ferit, tức là các pha thứ hai hòa tan chưa hết vào austenit. Sau quá trình tôi trong dầu, phần austenit được chuyển thành martenxit, trong khi lượng ferit vẫn giữ nguyên không chuyển biến (Hình 5, 6). Chính lượng ferit này làm cho thép mềm hơn, cơ tính sẽ thấp hơn nhưng độ dẻo dai khá cao.

Trái lại, khi tôi trong các khoảng nhiệt độ từ (840-880)°C, tổ chức tế vi thu được là martenxit và lượng nhỏ austenit dư. Ferit gần như không còn trong tổ chức của thép sau tôi. Khi ram, tổ chức phân rã dần từ martenxit ram (<300°C) sang tổ chức xoocbit ram ở nhiệt độ trên 400°C rất đặc trưng. Trong vùng nhiệt độ ram 400-600°C, tổ chức này có cơ tính tổng hợp tốt, độ bền cao kết hợp với độ dẻo dai tốt (Hình 12, 13, 15 và 16). Khi nhiệt độ ram trên 600°C, thép thải bền rất nhanh do quá trình phân rã hoàn toàn martenxit thành ferit và xementit diễn ra cũng rất nhanh, hạt có xu hướng thô hơn.

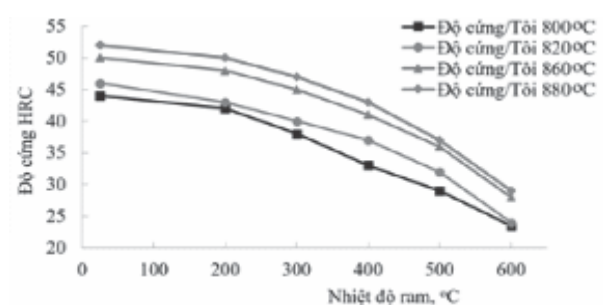
Khi tôi ở nhiệt độ cao trên 900°C, xu hướng hạt austenit lớn lên dẫn đến hạt càng thô to, quá trình ram tiếp theo sẽ ảnh hưởng đến tính chất sau cùng của thép (Hình 17, 18).

3.2. Các đặc trưng thử kéo

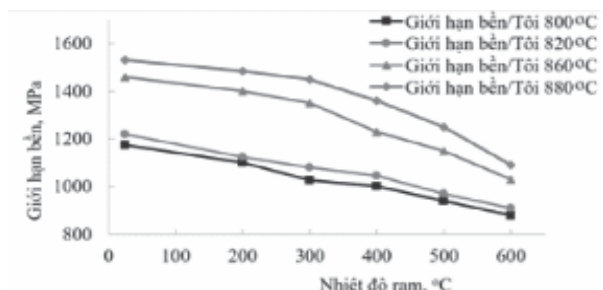
Sự thay đổi tính chất của thép 30CrMnSi còn thể hiện rõ hơn thông qua quá trình thử kéo. Hình 19 đến 22 mô tả sự phụ thuộc độ cứng, giới hạn bền, giới hạn chảy và độ giãn dài vào nhiệt độ tôi lựa chọn là 800, 820, 860 và 880°C và ram ở các nhiệt độ khác nhau.

Thông qua các đặc trưng thử kéo, rõ 

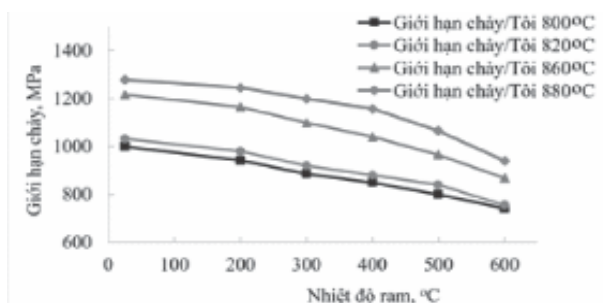
ràng, khi tôi trong vùng nhiệt độ giữa Ac_1 và Ac_3 (800-820°C) và ram ở các vùng nhiệt độ khác nhau từ (200-600)°C, độ bền của thép đạt được không cao (do trong tổ chức có ferit) nhưng độ dẻo cao so với tôi ở nhiệt độ trên Ac_3 (860-880°C) (trong tổ chức không còn ferit). Ở cùng nhiệt độ tôi, khi tăng nhiệt độ ram, độ bền của thép giảm và độ dẻo dai tăng lên. Với quá trình ram ở nhiệt độ thấp, tuy độ bền cao hơn nhưng độ dẻo khá thấp (dưới 10%).



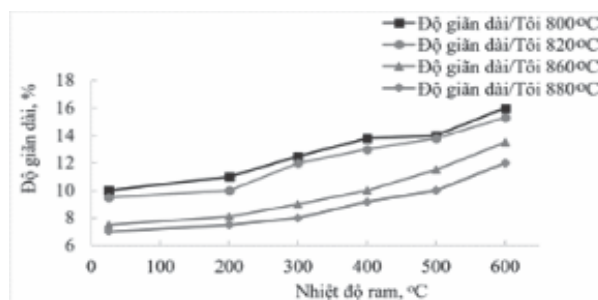
Hình 19. Sự phụ thuộc độ cứng của thép 30CrMnSi vào nhiệt độ tôi và ram.



Hình 20. Sự phụ thuộc giới hạn bền của thép 30CrMnSi vào nhiệt độ tôi và ram.



Hình 21. Sự phụ thuộc giới hạn chảy của thép 30CrMnSi vào nhiệt độ tôi và ram.



Hình 22. Sự phụ thuộc độ giãn dài của thép 30CrMnSi vào nhiệt độ tôi và ram.

Khi ram ở nhiệt độ cao (400-600)°C, độ dẻo đều tăng lên (lên đến 15% ở 600°C), nhưng độ bền vẫn đạt giá trị khá cao, thích hợp cho các chi tiết chịu tải trọng nặng và va đập. Khi ram ở nhiệt độ trên 600°C, tổ chức hạt trở nên thô hơn dẫn đến độ bền của thép giảm nhanh. Điều đó cho thấy, việc lựa chọn nhiệt độ tôi và ram thích hợp đối với thép 30CrMnSi sẽ căn cứ vào điều kiện làm việc cụ thể của chi tiết.

4. KẾT LUẬN

Qua khảo sát xử lý nhiệt đối với thép 30CrMnSi có thể thấy, nhiệt độ tôi và ram có ảnh hưởng rất lớn đến tổ chức và cơ tính của thép 30CrMnSi chế tạo từ sắt xộp. Các kết quả thực nghiệm cho thấy, khi tôi và ram ở nhiệt độ trong vùng Ac_1 và Ac_3 (800-820°C) sau đó ram ở các nhiệt độ khác nhau trong khoảng (200-600)°C cho độ bền thấp hơn nhưng có độ dẻo cao hơn khi tôi trong khoảng nhiệt độ (860-880)°C và ram ở các nhiệt độ tương tự. Ở cùng nhiệt độ tôi, khi tăng nhiệt độ ram, độ bền của thép giảm xuống nhưng độ dẻo dai tăng lên. Khi nhiệt độ giảm của thép trên 600°C, độ bền giảm rất nhanh, không đáp ứng yêu cầu của chi tiết kết cấu. Các kết quả khảo sát thực nghiệm này cho phép lựa chọn vùng nhiệt độ tôi và ram dựa vào yêu cầu làm việc của từng chi tiết cụ thể, đáp ứng nhu cầu đa dạng trong chế tạo các kết cấu cơ khí. ❖

Ngày nhận bài: 16/6/2025

Ngày phản biện: 30/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ning Li, Weifang Zhang, Hai Xu, Yikun Cai and Xiaojun Yan, “Corrosion Behavior and Mechanical Properties of 30CrMnSiA High-Strength Steel under an Indoor Accelerated Harsh Marine Atmospheric Environment”. *Materials* 2022, 15(2), 629. <https://doi.org/10.3390/ma15020629>.
- [2]. Liu Zhiqiang, Li Xiaohong, Ma Biao, et al., “Effect of heat treatment on impact property of 30CrMnSi steel”. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(4), pp. 74-76. <https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2015.04.017>.
- [3]. Wang Yu-fei, Zhi Ai-juan et al., “Heat treatment process of forged bucket tooth and its microstructure and properties”. *Heat Treatment of Metals*, Vol. 45, Issue (1), 2020, pp. 188-192. <https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2020.01.037>.
- [4]. Liu Zhiqiang, Li Chunjie et al., “Improvement on heat treatment process of 30CrMnSi steel”. *Hot Working Technology*, 2016, 45(4), pp. 168-170.
- [5]. Lin-zhi Wang and et. al., “SLM-manufactured 30CrMnSiA alloy: Mechanical properties and microstructural effects of designed heat treatment”. *Optics & Laser Technology*, Volume 107, November 2018, Pages 89-98 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.020>.
- [6]. Ziwei Feng and et. al., “Effect of laser texturing on the surface characteristics and bonding property of 30CrMnSiA steel adhesive joints”. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 47, November 2019, Pages 219-228 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.046>.
- [7]. Huiyuan Xiao, Yongxiang Geng, Haizhong Zheng, Yixin Xiao, “Microstructure evolution mechanisms and mechanical properties of 30CrMnSiA steel repaired by laser cladding”. *Materials Today Communications* 40, 2024(8):109845. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109845>.
- [8]. Lin-Zhi Wang, Wen-Hou Wei, “Selective Laser Melting of 30CrMnSiA Steel: Laser Energy Density Dependence of Microstructural and Mechanical Properties”. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 2018, 31 (8), pp. 807-814. <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0717-5>.
- [9]. Wu, Rongda and Geng, Yongxiang and Zheng, Haizhong and Xiao, Yixin and Xiao, HuiYuan, “Enhancing Structure and Properties of Laser Repairing 30CrMnSiA Alloy Assisted by Ultrasound and Heat Treatment”. *Materials Today Communications*, 8 Oct 2024, 26 Pages. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4978504>.
- [10]. Kong Yao, Zongde Liu, Liu Quanbing, “Effect of Laser Power on Microstructure and Properties of Ni-based Alloy Coatings on 30CrMnSiA Steel”. *Journal of Thermal Spray Technology* 31 (1), July 2022, pp. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-022-01416-x>.
- [12]. Nguyễn Trường An, Nguyễn Mạnh Tiến, Nguyễn Quốc Việt, “Nghiên cứu nấu luyện mác thép 30CrMnSi từ nguyên liệu sắt xộp trong lò cảm ứng”. *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, No. 10, 2016, trang 43-48.
- [13]. Đinh Bá Trữ, Trần Văn Đoàn, Phan Thanh Bình, Đinh Văn Hiến, Trần Công Thúc, Lê Văn Long, Nguyễn Tiến An, “Nghiên cứu luyện và xử lý nhiệt một số mác thép độ bền cao tiên tiến”. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 61(8) 8.2019, trang 49-53.
- [14]. Lại Đăng Giang, Nguyễn Trường An, Nguyễn Quốc Việt, Bùi Công Đoàn, “Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ công nghệ cơ nhiệt đến cơ tính của thép 30CrMnSi được nấu luyện từ sắt xộp”. *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 1+2 năm 2019, trang 28-34.
- [15]. Trần Danh Vũ, Phạm Thế Hùng, Lê Nhật Bằng, Tạ Thị Yến, Đinh Duy Phương, Phạm Sỹ Liên, Nguyễn Trung Kiên, Hoàng Thị Kim Dung, Trần Công Thúc, “Nghiên cứu công nghệ luyện thép mác 30CrMnSi từ sắt xộp bằng lò điện cảm ứng”. *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 8 năm 2021, trang 45.
- [16]. Kunitake, T. & Katou, T., “Effect of Various Alloying Elements on Si-Cr-Mo-V Steel”. *Tetsu-to-Hagané*, 50:4, 1964, pp. 666-668.
- [17]. Kasatkin, O.G. et al., “Calculation Models for Determining the Critical Points of Steel”. *Metal Science and Heat Treatment*, 26:1-2, January-February 1984, pp. 27-31.
- [18]. Hougardy, H.P., “*Werkstoffkunde Stahl – Band 1: Grundlagen*”. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1984, p. 229.
- [19]. Сорокин В.Г., Гervасьев М.А., “*Стали и сплавы*”. Марочник: Справочник. Издательство:Интермет; Год: 2001, 608с.
- [20]. William E. Bryson, “*Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels*”. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009, p. 35. ISBN: 978-3-446-41941-4 (eISBN: 978-3-446-43670-1).
- [21]. Nong Wan, Weihao Xiong and Jinping Suo, “Mathematical Model for Tempering Time Effect on Quenched Steel Based on Hollomon Parameter”. *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol.21, No.6, 2005, pp. 803-806.

KHẢO SÁT VẬT LIỆU CÓ BỀ DÀY KHÔNG ĐỒNG NHẤT ĐỂ TÍNH TOÁN LIỀU CHIẾU TRONG QUÁ TRÌNH KIỂM TRA MỐI HÀN

EXAMINATION OF MATERIALS WITH UNIFORM THICKNESS TO CALCULATE IRRADIATION DOSE DURING WELD INSPECTION

ThS. **Bùi Ánh Hưng**

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: bahung@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Thực tế hiện nay, một số đối tượng cần kiểm tra có bề dày không đồng nhất, độ chênh lệch về bề dày lớn. Việc chụp ảnh bức xạ gặp nhiều khó khăn, nếu không giải quyết được thì không kiểm tra được các đối tượng đó. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy khi tiến hành chiếu chụp vật liệu có bề dày không đồng nhất có thể giải quyết sự chênh lệch về bề dày là 30 mm. Độ đen, độ nhạy thu được trên phim nằm trong giới hạn tiêu chuẩn đánh giá có thể dễ dàng đưa ra liều chiếu phù hợp khi dùng nê-mi làm vật liệu che chắn.

Từ khóa: Nê-mi ảo; Độ đen; Liều chiếu; Mối hàn.

ABSTRACT

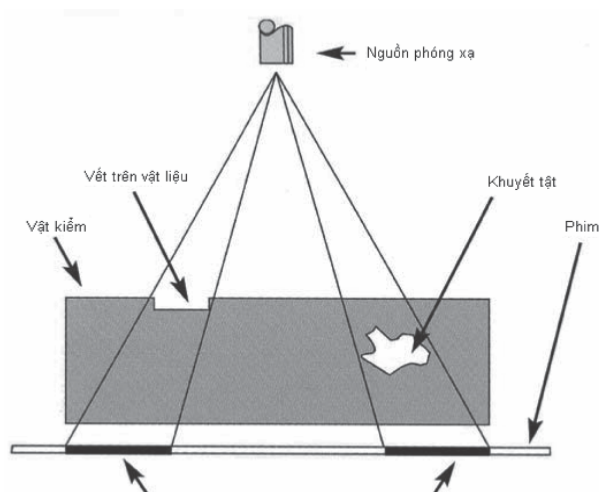
In reality today, some objects that need to be inspected have heterogeneous thicknesses, with large differences in thickness. Radiation imaging faces many difficulties. If it cannot be resolved, it will be impossible to examine those objects. This article presents the results of experimental research showing that when scanning materials with non-uniform thickness, a thickness difference of 30 mm can be resolved. The black level and sensitivity obtained on the film are within the limits of evaluation standards, making it easy to determine the appropriate exposure dose when using lead wedge as a shielding material.

Keywords: Virtual wedge; Blackness; Radiation dose; Weld.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kiểm tra khuyết tật mối hàn được sử dụng để đánh giá độ sai hỏng và đồng đều của các sản phẩm, Nhờ sớm phát hiện được các bất thường, kịp thời thay thế khắc phục với các bề dày không đồng nhất chúng ta phải phân vùng thành nhiều phim độc lập và đánh giá từng phần trên mẫu. Điều này rất mất công và tốn nhiều chi phí cũng như phải bố trí nhiều phân đoạn thực nghiệm rời rạc. Việc chụp ảnh bức xạ gặp nhiều khó khăn, Ứng với mỗi mẫu khác nhau, ta có thể dễ dàng đưa ra các giải pháp phù hợp [2], [[3].

* Cơ sở vật lý của phương pháp chụp ảnh bức xạ



Hình 1. Ảnh khuyết tật sau khi chiếu bức xạ [2].

Phương pháp chụp ảnh bức xạ sử dụng nguyên lý truyền qua và sự hấp thụ khác nhau đối với những năng lượng khác nhau của vật liệu để kiểm tra các khuyết tật bên trong đối tượng. Một chùm bức xạ tới sau khi đi qua các bề dày khác nhau của mẫu vật thì sự thay đổi cường độ của chùm bức xạ qua vật liệu sẽ được ghi lại trên phim, từ đó có thể giải đoán để phân tích những khuyết tật hoặc sự hư hỏng nằm bên trong mẫu [1], [4].

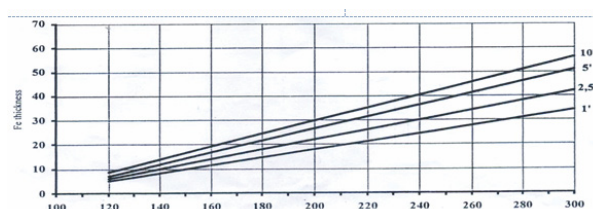
2. TRANG THIẾT BỊ THỰC NGHIỆM

* Máy phát tia X dòng GXL

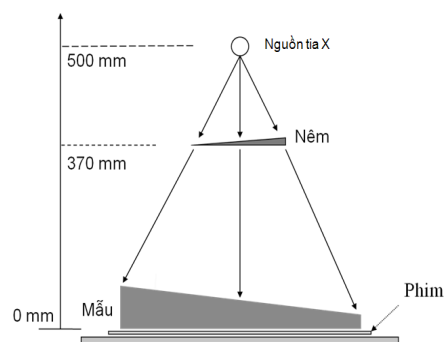


Hình 2. Máy phát tia X dòng GXL

- Tên sản phẩm: GXL-306D.
- Nguồn nuôi: 110/220V, 50/60Hz.
- Cao áp đầu phát: 120kV-300kV.
- Dòng phát định danh: mA-5mA-6mA.
- Chu kỳ làm việc: 50% ở 200 C.
- Điểm hội tụ: 3x3 mm.
- Góc phát xạ: 500.
- Mức bảo vệ: IP 55.
- Tấm lọc bức xạ: 1mm Be.



Hình 3. Biểu đồ chiếu GXL-306D



Hình 4. Bố trí chụp phim

Cơ sở dẫn đến thiết kế mẫu:

- Do máy GXL-306D chụp được bề dày lớn nhất là 55mm.

- Kích thước phim sử dụng là dài x rộng = 200mm x 100mm.

Bảng 1. Bề dày tương đương sắt của mẫu và nê

Bề dày mẫu (mm)	6	10	15	20	25	30
Bề dày nê (mm)	2,4	2	1,5	1,1	0,6	0,2
Bề dày tương đương sắt	32,4	32	31,5	32,1	31,6	32,2

Để có thể giải quyết bài toán khảo sát vật liệu có bề dày thay đổi, ta sử dụng phương pháp dùng nê chì. Nê là vật liệu đưa vào có tác dụng làm thay đổi liều chiếu đến phim, có nghĩa là liều chiếu qua nê và mẫu thực nghiệm khi đến phim đã được đồng đều thể hiện ở sự giảm chênh lệch độ đen trên phim, do vậy cũng có đặc điểm giống mẫu thực nghiệm là có bề dày không đồng nhất. [1]. Nê vừa có tác dụng bù độ đen, vừa có tác dụng lọc tia. Bề dày nhất là 2mm, tương đương với 30mm sắt ở điện áp khảo sát.

Nê phải được chế tạo không có khuyết tật trên nê, ở đây ta lựa chọn chì làm vật liệu chế tạo nê. Kích thước nê: dài x rộng = 58mm x 42mm.

3.2. Kết quả khảo sát mẫu và nê

Bảng 2. Kết quả đo độ đen mẫu 1, nê 1

Bề dày (mm)	20	25	30	35	40	45	50
Độ đen không nê	3,99	3,56	2,78	2,45	1,86	1,56	1,33
Độ đen có nê	2,65	2,43	2,27	2,11	1,84	1,79	1,57
Độ nhạy	1,10%			1,27%			

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tính toán liều chụp

Theo nhà sản xuất với phim Fuji 100 liều chiếu: $E(R) = 1R = FF$ thì độ đen thu được $OD = 2$.

Tính toán liều chiếu: Căn cứ vào số liệu của nhà sản xuất, ở điện áp 300kV, dòng phát 6mA, khoảng cách từ máy đến phim là 50cm, trong thời gian 1 phút phim sẽ nhận được một liều là 65R, độ đen trên phim lúc đó bằng 2. Trong thời gian 1s liều chiếu là: $R = 65R/60s = 1,08R$.

Cứ 1s thì liều chiếu tới phim là 1,08R tại khoảng cách 50cm từ phim đến máy. Vì bước thời gian của máy là 1s nên ta chọn khảo sát ở khoảng cách 100cm. Ta có:

$$E_1 \times d_1^2 = E_2 \times d_2^2$$

$$\Rightarrow E_2 = \frac{d_1^2 \times E_1}{d_2^2}$$

Theo đó, liều chiếu tại khoảng cách 100cm là: $E(R) = 1,08 \times (50/100)^2 = 0,27R$.

Thường hệ số phim tăng lên, chọn liều chiếu vào phim bắt đầu từ 1R.

Theo tính toán với thời gian chiếu $t = 4s$ thì liều chiếu $E(R) = 4 \times 0,27 = 1,08R > 1R$ nên ta bắt đầu tiến hành chụp chiếu với thời gian chụp của liều đầu tiên là 4s, các liều tiếp theo sẽ tăng dần theo bước 1s.

Bảng 3. Kết quả đo độ đen mẫu 1, năm 2

Bề dày (mm)	20	25	30	35	40	45	50
Độ đen không nê	3,99	3,56	2,78	2,45	1,86	1,56	1,33
Độ đen có nê 2	3,09	2,85	2,6	2,31	2,11	1,97	1,81
Độ nhạ	1,10%			1,27%			

Bảng 4. Kết quả đo độ đen mẫu 2, năm 1

Bề dày (mm)	20	25	30	35	40	45	50
Độ đen không nê	3,99	3,56	2,78	2,45	1,86	1,56	1,33
Độ đen có nê 1	2,69	2,36	2,16	2,03	1,81	1,73	1,63
Độ nhạ	1,10%			1,27%			

Bảng 5. Kết quả đo độ đen mẫu 2, năm 2

Bề dày(mm)	20	25	30	35	40	45	50
Độ đen không nê	3,99	3,56	2,78	2,45	1,86	1,56	1,33
Độ đen có nê 2	2,85	2,53	2,27	2,14	1,93	1,79	1,65
Độ nhạ	1,10%			1,27%			

Bảng 6. Kết quả đo độ đen mẫu 2, năm 1 khi tăng thời gian thêm 60 giây

Bề dày(mm)	20	25	30	35	40	45	50
Độ đen không nê	3,99	3,56	2,78	2,45	1,86	1,56	1,33
Độ đen có nê 1	2,94	2,59	2,41	2,33	2,17	2,01	1,79
Độ nhạ	1,10%			1,27%			

Bảng 7. Kết quả đo độ đen mẫu 3, năm 1

Bề dày (mm)	6	10	15	20	25	30
Độ đen không nê	3,99	3,49	2,74	2,25	1,87	1,74
Độ đen có nê 1	2,83	2,58	2,29	1,97	1,75	1,67
Độ nhạ	1,10%					

Bảng 8. Kết quả đo độ đen mẫu 3, năm 2

Bề dày (mm)	6	10	15	20	25	30
Độ đen không nê	3,99	3,49	2,74	2,25	1,87	1,74
Độ đen có nê 2	2,99	2,62	2,36	2,22	2,09	1,97
Độ nhạ	1,10%					



Bảng 9. Kết quả đo độ đen mẫu 3, nê 3

Chiều dày (mm)	6	10	15	20	25	30
Độ đen không nê	3,99	3,49	2,74	2,25	1,87	1,74
Độ đen có nê 3	2,58	2,33	2,02	1,84	1,72	1,7
Độ nê	1,10%					

4. KẾT LUẬN

+ Từ cơ sở lý thuyết và kết quả thực nghiệm thu được cho thấy, bằng phương pháp thay đổi liều chiếu khi tiến hành chiếu chụp vật liệu có bề dày không đồng nhất, các bề dày từ 10 mm đến 40 mm, từ 15mm đến 45mm, từ 20mm đến 50mm đều cho kết quả đạt yêu cầu. Độ đen, độ nê thu được trên phim nằm trong giới hạn tiêu chuẩn đánh giá.

+ Có thể chế tạo các bộ nê chì cho các máy phát tia X khác nhau.

Sử dụng nê chì trong khảo sát vật liệu có bề dày không đồng nhất đã giải quyết được vấn đề cốt lõi là giảm được sự chênh lệch độ đen của phim khi độ chênh lệch bề dày lớn. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong thực tế

khi kiểm tra các vật đúc, các mối hàn có bề dày không đồng nhất. ❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**

Ngày phản biện: **20/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. PGS,TS. Phùng Văn Duân, “*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2012.
- [2]. Biên dịch: Đào Quang Long, Nguyễn Quang Hải, “*Kiểm tra kiểm tra vật liệu bằng kỹ thuật chụp ảnh bậc 2*”. Vienna, 1998.
- [3]. TS. Nguyễn Ngọc Nguyên, “*Thăm dò khuyết tật trong kim loại*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2010.
- [4]. Nguyễn Trọng My, “*Các phương pháp kiểm tra không phá hủy – Chụp ảnh phóng xạ*”. NXB. Giáo dục Việt Nam, 2014.

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÁY IN 3D RESIN THEO CÔNG NGHỆ LCD

STUDY ON DESIGN AND FABRICATION OF A RESIN 3D PRINTER USING LCD TECHNOLOGY

Nguyễn Anh Tuấn¹, Nguyễn Quang Dũng², Nguyễn Văn Khiết¹

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

²Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế, chế tạo và thực nghiệm một máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD. Trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu trước đây, nhóm tác giả đã nghiên cứu thiết kế chế tạo một máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD, với mong muốn làm chủ công nghệ của máy để phục vụ công tác đào tạo, nghiên cứu kỹ thuật và chế tạo mô hình kỹ thuật số. Ngoài ra, các thực nghiệm cũng đã được tiến hành để khảo sát đánh giá ảnh hưởng của các thông số in như chiều dày lớp in, góc tạo mẫu và thời gian phơi sáng đến độ nhám bề mặt sản phẩm. Kết quả được xử lý bằng hồi quy thực nghiệm, từ đó xác lập được mô hình toán học thể hiện ảnh hưởng của các thông số trên đến chất lượng bề mặt.

Từ khóa: Máy in 3D; Resin; LCD.

ABSTRACT

This study presents the design, fabrication, and experimental evaluation of a 3D printer using LCD-based resin technology. Based on inheriting previous research, the authors have researched, designed and manufactured a resin 3D printer to support educational and research activities. Experiments examined the effects of printing parameters such as layer thickness, model angle, and exposure time on surface roughness. Regression analysis established a mathematical model correlating input parameters to surface quality.

Keywords: 3D printer; Resin; LCD.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ in 3D ngày càng được ứng dụng phổ biến trong các lĩnh vực kỹ thuật, sản xuất và giáo dục. Trong số đó, công nghệ in resin sử dụng màn hình LCD nổi bật bởi độ phân giải cao, chi phí thấp và phù hợp cho mục

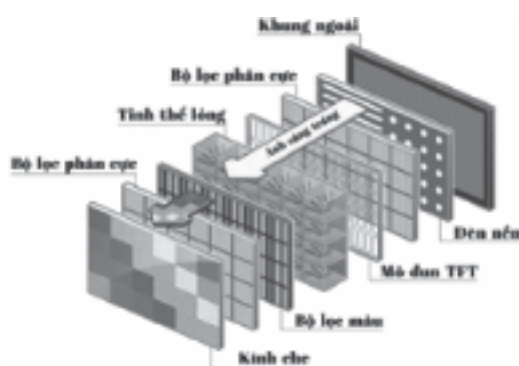
tiêu đào tạo và tạo mẫu nhanh. Một số công trình nghiên cứu đã được các hãng chế tạo máy trên thế giới ứng dụng để chế tạo thành các sản phẩm thương mại [1-5]. Tuy nhiên, các công bố của các hãng thường mang tính chất giới thiệu, không có tài liệu thiết kế và công nghệ cụ thể nên khó áp dụng.



Ở Việt Nam, công nghệ in 3D sử dụng LCD đã được nghiên cứu và ứng dụng ngày càng phổ biến trong thực tế. Tuy nhiên, kết quả đạt được còn những hạn chế nhất định. Các nghiên cứu về tạo mẫu để ứng dụng trong công nghiệp đã được chú trọng, nhiều tác giả, cơ sở sản xuất đã đề xuất nghiên cứu chế tạo máy in 3D resin sử dụng LCD như nhóm nghiên cứu thuộc Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh [6], nhóm nghiên cứu thuộc Trung tâm Nghiên cứu in 3D Y sinh tại Trường VinUni [7],.... Các kết quả về nghiên cứu được đề cập ở trên đã đạt được các kết quả bước đầu, tuy nhiên việc thiết kế và chế tạo hệ thống máy in 3D resin theo công nghệ LCD phù hợp với điều kiện kỹ thuật trong nước vẫn còn là một thách thức. Bài báo này trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và thực nghiệm máy in resin sử dụng công nghệ LCD ứng dụng trong giảng dạy tại Khoa Cơ khí và Câu lạc bộ STEM, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp.

2. NỘI DUNG

2.1. Nguyên lý hoạt động của máy in 3D resin theo công nghệ LCD



Hình 1. Cấu tạo màn hình LCD

Màn hình LCD (Liquid Crystal Display) có cấu tạo như thể hiện trên hình 1, bao gồm nhiều lớp vật liệu như sau:

- **Tinh thể lỏng:** Đây là lớp chủ yếu trong màn hình, có khả năng thay đổi cấu trúc khi có điện áp, điều khiển ánh sáng đi qua.

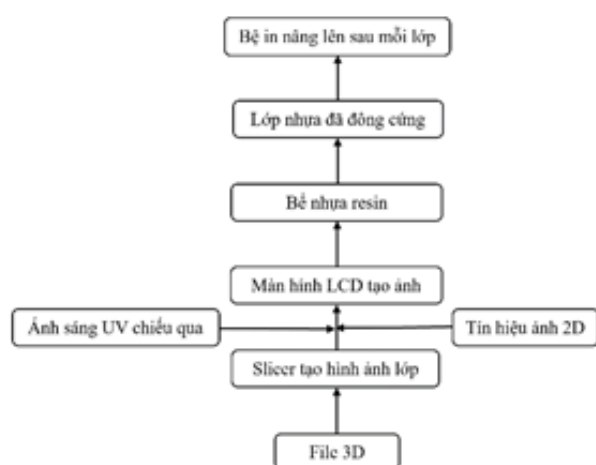
- **Đèn nền:** Màn hình LCD không thể tự phát sáng, vì vậy đèn nền (thường là đèn LED hoặc CCFL) cung cấp nguồn sáng cho màn hình.

- **Lớp phân cực:** Giúp ánh sáng đi qua các tinh thể lỏng một cách có kiểm soát, cho phép hiển thị hình ảnh chính xác.

- **Bộ lọc màu:** Tinh thể lỏng chỉ có thể điều chỉnh độ sáng, nên màn hình LCD cần bộ lọc màu để tạo ra các màu sắc khác nhau bằng cách thay đổi cách ánh sáng đi qua.

Máy in 3D sử dụng công nghệ LCD hoạt động dựa trên nguyên lý quang trùng hợp nhựa cảm quang (resin) dưới tác động của ánh sáng UV như thể hiện trên hình 2. Quá trình tạo mẫu được thực hiện theo từng lớp, nhờ khả năng kiểm soát ánh sáng chính xác của màn hình LCD. Cụ thể, nguồn sáng UV (thường là đèn LED ma trận) phát ra ánh sáng đều, đi qua một tấm phân tán ánh sáng (diffuser) giúp đảm bảo phân bố đồng đều. Ánh sáng này sau đó đi qua màn hình LCD, nơi hiển thị hình ảnh mặt cắt (slice) 2D của mô hình 3D ở mỗi lớp in. Màn hình LCD đóng vai trò như một lớp chắn sáng, chỉ cho phép ánh sáng đi qua tại những vị trí tương ứng với vùng cần được làm cứng của lớp resin. Lớp resin lỏng được chứa trong một bể in (VAT), thường có đáy trong suốt được phủ lớp chống dính như FEP (Fluorinated Ethylene Propylene). Khi ánh sáng UV chiếu xuyên qua màn hình LCD và đáy bể, sẽ kích hoạt phản ứng trùng hợp tại những vùng nhất định, khiến resin tại đó chuyển sang trạng thái rắn. Sau mỗi lớp in, bàn nâng di chuyển lên một khoảng cách bằng độ dày lớp in (thường

từ 25-100 micromet), cho phép resin mới chảy vào khoảng trống để tiếp tục quá trình tạo lớp tiếp theo. Quá trình này được lặp lại nhiều lần cho đến khi toàn bộ mô hình 3D được hoàn thành. Sau khi in xong, sản phẩm sẽ được lấy ra khỏi bàn nâng, làm sạch bằng dung môi như isopropyl alcohol, và thường cần được xử lý hậu kỳ bằng ánh sáng UV để hoàn tất quá trình đông cứng.



Hình 2. Sơ đồ quy trình in 3D resin sử dụng công nghệ LCD

2.2. Thiết kế kết cấu máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD

Sau khi đã xác định được nguyên lý hoạt động của máy in 3D resin công nghệ LCD, bước tiếp theo trong quá trình thiết kế là xác định các cụm chức năng chính của hệ thống. Việc phân tích và lựa chọn các cụm chức năng phù hợp là cơ sở quan trọng để đề xuất phương án thiết kế tối ưu, đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật, tính ổn định, hiệu quả và khả năng chế tạo.

+ Lựa chọn nguồn sáng UV: Trong máy in 3D resin theo công nghệ LCD, ánh sáng UV là yếu tố kích hoạt phản ứng quang trùng hợp của nhựa cảm quang (resin), giúp tạo thành các

lớp vật liệu rắn từ chất lỏng. Do đó, lựa chọn loại đèn UV phù hợp về bước sóng, cường độ và khả năng phân bố ánh sáng là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng bản in, độ bền của thiết bị và tốc độ in. Trên cơ sở phân tích ba phương án nguồn sáng UV phổ biến hiện nay bao gồm LED UV dạng Matrix, LED UV dạng COB và đèn UV Halogen, tác giả đã lựa chọn sử dụng đèn LED UV dạng Matrix có bước sóng 405 nm, làm nguồn sáng chính cho máy in 3D công nghệ LCD.

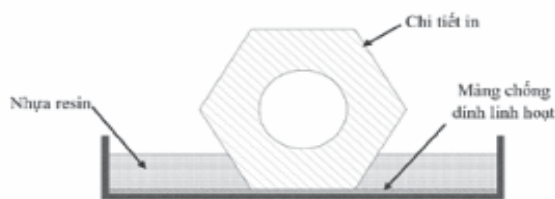
+ Lựa chọn màn hình LCD: Trong công nghệ in 3D resin, màn hình LCD đóng vai trò như một mặt nạ quang động (dynamic mask), kiểm soát khu vực ánh sáng UV được truyền qua để làm cứng nhựa cảm quang tại những vị trí mong muốn. Việc lựa chọn màn hình phù hợp không chỉ ảnh hưởng đến độ chính xác và độ chi tiết của sản phẩm in, mà còn quyết định đến tốc độ in, độ bền của hệ thống, và khả năng tương thích với nguồn sáng. Trong nghiên cứu này lựa chọn sử dụng màn hình LCD monochrome 7K để bảo đảm sự cân bằng giữa hiệu suất quang học, chất lượng in và độ bền trong quá trình sử dụng.

+ Lựa chọn cơ cấu thay đổi mức nhựa: Trong quá trình in 3D resin, lượng nhựa resin trong bể chứa sẽ liên tục giảm do sự tiêu thụ nhựa trong quá trình tạo lớp. Việc duy trì mức resin ổn định là rất quan trọng để đảm bảo độ chính xác lớp in, độ bám dính, cũng như hạn chế lỗi in. Trong ba phương án nạp nhựa resin trong quá trình in phổ biến hiện nay gồm bơm và cảm biến, bình phụ nổi thông, nạp resin thủ công. Mỗi phương pháp có những ưu nhược điểm riêng, phù hợp với từng yêu cầu và đặc điểm sản xuất khác nhau. Trong nghiên cứu này lựa chọn phương án bơm và cảm biến giúp tiết kiệm thời gian và nâng cao hiệu quả sản xuất, đồng thời giúp hệ thống in 3D hoạt động



ổn định, giảm thiểu rủi ro trong quá trình in, đặc biệt là trong các ứng dụng sản xuất quy mô lớn và liên tục.

+ Cơ cấu chống dính, chân không và bể in: Trong quá trình in 3D bằng công nghệ LCD, sau khi mỗi lớp resin được chiếu sáng và đông đặc, bề mặt xây dựng cần tách lớp in ra khỏi màn chiếu để tiếp tục in lớp kế tiếp. Tuy nhiên, do đặc tính nhớt và khả năng chảy loãng của resin, đồng thời do sự tiếp xúc gần như kín giữa lớp in và màng phim/màn chiếu, nên hai hiện tượng bị dính và tạo chân không xảy ra cùng lúc. Hai hiện tượng này cộng hưởng với nhau, gây lực kéo rất lớn lên mô hình in. Nếu không được kiểm soát, chúng sẽ dẫn đến: Lỗi tách lớp (delamination); Gãy lớp in; Mô hình bị biến dạng; Tăng lực kéo lên các bộ phận cơ khí, giảm tuổi thọ thiết bị. Dựa trên tiêu chí đơn giản hóa kết cấu cơ khí, dễ chế tạo và vận hành, giảm chi phí đầu tư ban đầu, mà vẫn đảm bảo hiệu quả giảm lực dính và hạn chế lực chân không ở mức hợp lý, ở đây lựa chọn phương án sử dụng màng FEP kết hợp với bể in phẳng, không trang bị cơ cấu nghiêng như thể hiện trên hình 3 để chống dính và chống chân không trong quá trình in.

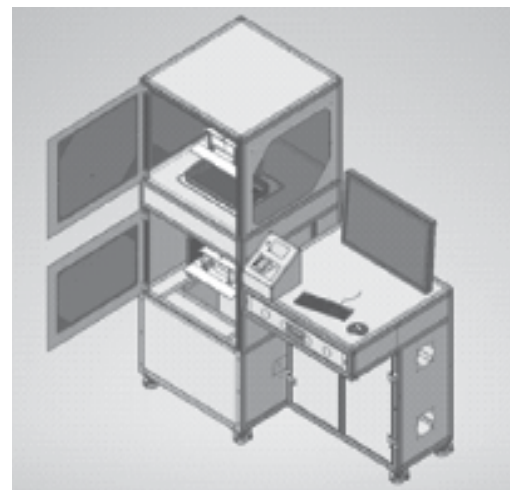
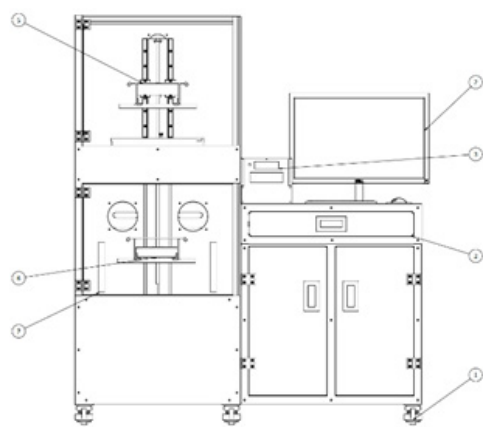


Hình 3. Bể in gắn màng chống dính linh hoạt

+ Cụm nâng hạ chi tiết in theo trục Z: Để biến chuyển động quay thành chuyển động tịnh tiến, tác giả lựa chọn sử dụng động cơ servo và bộ truyền vít me đai ốc bi C-KBS1204-400. Ưu điểm của bộ truyền này là truyền động chính xác, khả năng chịu tải dọc lớn và độ bền vận hành cao. Đặc biệt, vít me bi còn có khả năng

tự hãm cơ học tốt, đảm bảo vị trí ổn định khi tạm dừng hoặc trong các pha tách lớp.

Trên cơ sở phân tích lựa chọn các cụm chức năng của máy, thực hiện thiết kế và lắp ráp các cụm chi tiết trên môi trường Assembly của phần mềm Inventor sẽ xây dựng được kết cấu chung của của máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD. Từ đó thực hiện thiết kế cụm bàn máy sẽ xây dựng được kết cấu tổng thể hệ thống cơ khí của máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD như thể hiện như thể hiện trên hình 4.



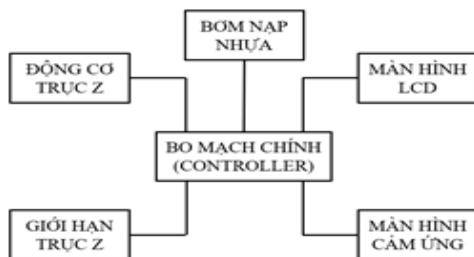
(1): Bánh xe; (2): Cụm màn hình; (3): Bảng điều khiển; (4): Màn hình; (5): Cụm máy in; (6): Cụm sấy rửa; (7): Đèn UV

Hình 4. Kết cấu hệ thống cơ khí của máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD

2.3. Thiết kế hệ thống điều khiển của máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD

2.3.1. Lựa chọn hệ thống điều khiển cụm máy in

Hệ thống điều khiển có vai trò trung tâm trong việc điều phối hoạt động của hệ thống cơ khí, điều khiển cường độ và thời gian chiếu sáng màn hình LCD, đồng thời xử lý lệnh từ phần mềm điều khiển in 3D (slicer). Việc lựa chọn đúng vi điều khiển (bo mạch chủ), driver động cơ, cảm biến giới hạn và các khối giao tiếp là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng bản in, độ ổn định và khả năng mở rộng của hệ thống.

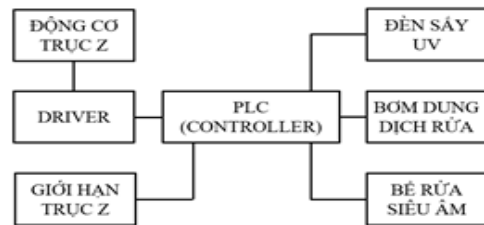


Hình 5. Sơ đồ hệ thống điều khiển cụm máy in 3D resin công nghệ LCD

Bo mạch chính là bộ não trung tâm của máy in 3D, đóng vai trò điều khiển toàn bộ hệ thống – từ truyền động cơ khí, hiển thị thông tin, đến điều khiển nguồn sáng và giao tiếp với người dùng. Trong số các loại bo mạch hiện nay, bo mạch của hãng Anycubic được đánh giá cao về độ ổn định, phổ biến, giá thành hợp lý và hỗ trợ mạnh mẽ cho máy in 3D resin công nghệ LCD. Mạch Anycubic thường tích hợp sẵn driver, có khả năng điều khiển LED UV, hỗ trợ cảm biến và hiển thị thông tin rõ ràng qua giao diện cảm ứng. Do đó, dựa trên yêu cầu hệ thống và cấu hình máy in 3D resin công nghệ LCD đặt ra, nghiên cứu này lựa chọn bo mạch chính hãng Anycubic. Bo mạch này đáp ứng đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật, dễ tích hợp vào hệ cơ khí đã thiết kế và giúp đảm bảo độ chính xác, độ ổn định của hệ điều khiển trong quá trình in.

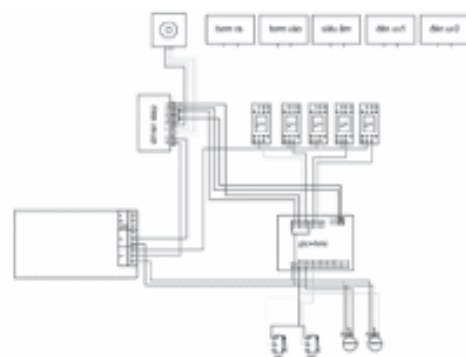
2.3.2. Lựa chọn hệ thống điều khiển cụm sấy rửa

Trong quá trình xây dựng hệ thống điều khiển của cụm sấy rửa máy in 3D resin, việc lựa chọn PLC phù hợp là bước quan trọng để đảm bảo các chu trình rửa, sấy và chiếu UV được thực hiện chính xác theo thời gian và quy trình đã định. Một PLC tích hợp màn hình HMI ngay trên thiết bị sẽ giúp quá trình xử lý đáp ứng yêu cầu, tối ưu không gian tủ điện, giảm thiểu lỗi đấu nối. Trên cơ sở tìm hiểu các dòng PLC trên thị trường, tác giả đã lựa chọn PLC YK HMI FX3U và sử dụng driver DM542 để điều khiển động cơ bước Step 57.



Hình 6. Sơ đồ hệ thống điều khiển cụm sấy rửa chi tiết

Trên cơ sở này, tác giả đã xây dựng sơ đồ đấu nối giữa các thiết bị để đảm bảo hệ thống điều khiển hoạt động chính xác và an toàn như thể hiện trên hình 7. Trong sơ đồ này, PLC đóng vai trò phát tín hiệu điều khiển (xung bước và chiều quay) đến driver, thông qua các ngõ ra số (digital output).

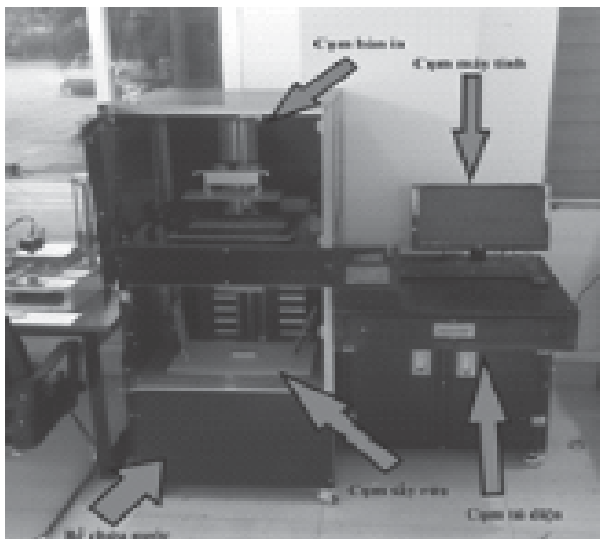


Hình 7. Sơ đồ mạch điện PLC của cụm sấy rửa

2.4. Thực nghiệm chế tạo và thực nghiệm đánh giá hiệu quả hoạt động

2.4.1. Thực nghiệm chế tạo

Từ thiết kế kết cấu cơ khí và hệ thống điều khiển, nhóm nghiên cứu đã tiến hành gia công chế tạo các chi tiết cơ khí và lựa chọn các thiết bị, linh kiện điện tử đã tính chọn. Sau đó, nhóm tiến hành lắp ráp, điều chỉnh và thử nghiệm thành công máy in 3D theo công nghệ LCD với các thông số kỹ thuật đúng theo thiết kế như thể hiện trên hình 8.



Hình 8. Hình ảnh máy in 3D resin theo công nghệ LCD sau khi thiết kế chế tạo

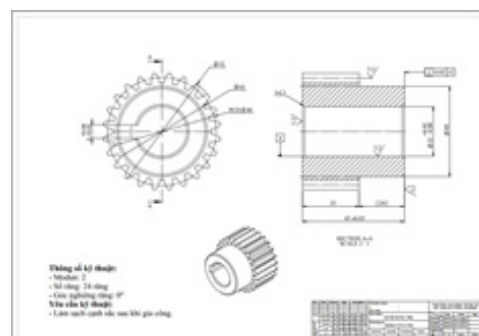
2.4.2. Thực nghiệm đánh giá hiệu quả hoạt động

Để đánh giá kiểm nghiệm khả năng hoạt động của máy, nhóm nghiên cứu đã tiến hành in thử nghiệm một số chi tiết điển hình. Kết quả cho thấy máy in 3D resin mà nhóm thiết kế chế tạo hoạt động ổn định, đảm bảo các thông số kỹ thuật yêu cầu đã đưa ra, sản phẩm in có độ chính xác kích thước và hình học đạt yêu cầu kỹ thuật đặt ra.



Hình 9. Hình ảnh một số sản phẩm được thực nghiệm in trên máy

Ngoài ra, để đánh giá khả năng làm việc của máy in 3D đã thiết kế chế tạo, nhóm tác giả đã tiến hành thực nghiệm theo ma trận trực giao L9 như trong bảng 1, nhằm đánh giá ảnh hưởng của ba thông số chế độ in quan trọng (chiều dày lớp in σ , góc tạo mẫu α , thời gian phơi sáng τ) đến độ nhám bề mặt (R_a) của chi tiết in, trong đó sản phẩm in là chi tiết bánh răng có cấu tạo như thể hiện trên hình 10. Trong đó, độ nhám bề mặt chi tiết được đo bằng máy đo độ nhám Mitutoyo SJ-301 Surf test.



Hình 10. Bản vẽ chi tiết bánh răng được sử dụng làm mẫu in thử nghiệm

Bảng 1. Bảng ma trận quy hoạch thực nghiệm L9 và kết quả thực nghiệm với sản phẩm in là chi tiết bánh răng

Số thí nghiệm	Biến mã hóa			Biến thực nghiệm			Kết quả thí nghiệm			
	x_1	x_2	x_3	σ	α	τ	Ra1	Ra2	Ra3	Ra _{tb}
1	1	1	1	80	60	6	9,27	9,55	9,32	9,38
2	1	2	2	80	35	4	7,45	7,32	7,93	7,57
3	1	3	3	80	10	2	6,96	6,37	6,33	6,55
4	2	1	2	55	60	4	7,52	7,47	7,20	7,40
5	2	2	3	55	35	2	7,23	7,34	7,59	7,39
6	2	3	1	55	10	6	3,57	3,66	3,38	3,54
7	3	1	3	30	60	2	5,88	5,51	5,78	5,72
8	3	2	1	30	35	6	4,23	4,31	4,83	4,46
9	3	3	2	30	10	4	2,46	2,84	2,20	2,50

Sau khi tiến hành thực nghiệm in và thu thập dữ liệu sẽ nhận được bảng kết quả thực nghiệm giá trị độ nhám bề mặt với 9 bộ thông số chế độ in khác nhau như thể hiện trong bảng 1. Trên cơ sở này, ứng dụng phương pháp hồi quy thực nghiệm đã xác định được hàm toán học thể hiện mối quan hệ giữa các thông số chế độ công nghệ (δ , α , τ) đối với các yếu tố đầu ra là độ nhám bề mặt chi tiết (Ra) như sau:

$$Ra = a_0 \cdot \sigma^{a_1} \cdot \alpha^{a_2} \cdot \tau^{a_3}$$

$$Ra = -1,71814 \cdot \sigma^{0.66904} \cdot \alpha^{0.33942} \cdot \tau^{-0.23889}$$

Sau khi xác định được hàm hồi quy ở trên cần kiểm tra sự đồng nhất của các phương sai theo tiêu chuẩn Cochran, kiểm tra mức ý nghĩa của các hệ số trong phương trình hồi quy theo chuẩn Student, kiểm tra sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm theo chuẩn Fisher [8]. Kết quả kiểm tra cho thấy:

$$+, G_m = \frac{\max S_u^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} = \frac{0,016431}{0,030386} \approx 0,54073 < G_b(2; 9; 0,05) \approx 0,801$$

→ Điều này chứng tỏ phương sai là đồng nhất,

độ nhiễu là ổn định khi thay đổi các thông số thí nghiệm.

$$+, |t_{a0}| = \left| \frac{a_0}{S_{a0}} \right| = \left| \frac{-1,71814}{0,21936} \right| = |-7,8324| > t_a(0,05; 5) \approx 2,02$$

$$+, t_{a1} = \frac{a_1}{S_{a1}} = \frac{0,66904}{0,04793} = 13,9595 > t_a(0,05; 5) \approx 2,02$$

$$+, t_{a2} = \frac{a_2}{S_{a2}} = \frac{0,33942}{0,02617} = 12,9716 > t_a(0,05; 5) \approx 2,02$$

$$+, |t_{a3}| = \left| \frac{a_3}{S_{a3}} \right| = \left| \frac{-0,23889}{0,0433} \right| = |-5,51732| > t_a(0,05; 5) \approx 2,02$$

→ Điều này chứng tỏ ba hệ số a_j trong phương trình hồi quy đều có ý nghĩa vì thỏa mãn điều kiện:

$$|t_{aj}| > t_a(0,05; 5)$$

$$+, F_m = \frac{S_{du}^2}{S_{th}^2} = \frac{0,01156}{0,00337} = 3,42465 < F_b(0,05; 5; 18) \approx 4,25$$

→ Điều này, chứng tỏ phương trình hồi quy phù hợp với thực nghiệm.

Như vậy, kết quả kiểm tra cho thấy hàm hồi quy thực nghiệm ở đây là đảm bảo độ tin cậy

cây. Do đó, trên cơ sở hàm hồi quy thực nghiệm xác định được ở trên có thể rút ra một số nhận xét có ý nghĩa định hướng cho nghiên cứu và ứng dụng trong quá trình in trên máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD như sau:

+ Khi tăng chiều dày lớp in σ thì độ nhám bề mặt Ra của chi tiết sẽ tăng.

+ Khi tăng góc tạo mẫu α thì độ nhám bề mặt Ra của chi tiết cũng sẽ tăng.

+ Khi tăng thời gian phơi sáng τ thì độ nhám bề mặt Ra của chi tiết cũng sẽ giảm.

Đặc biệt, trong ba thông số đầu vào với phạm vi khảo sát đã thực hiện trong nghiên cứu này thì chiều dày lớp in σ có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt của chi tiết in. Đây là cơ sở để giúp người vận hành có thể lựa chọn được chế độ in hợp lý.

3. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy in 3D theo công nghệ LCD. Dựa trên nền tảng lý thuyết và yêu cầu thực tế, nghiên cứu đã thiết kế và chế tạo được một máy in 3D resin sử dụng công nghệ LCD phù hợp với điều kiện sản xuất thực tế ở Việt Nam. Sau khi chế tạo, máy in đã được tiến hành thử nghiệm in với những điều kiện kỹ thuật khác nhau theo mảng ma trận trực giao L9. Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, một hàm hồi quy thực nghiệm thể hiện mối quan hệ giữa ba thông số đầu vào (chiều dày lớp in, thời gian phơi sáng, góc tạo mẫu) đến độ nhám bề mặt chi tiết in đã được xác định. Từ đó cho thấy, chiều dày lớp in là thông số ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt. Máy in được chế tạo và lắp ráp có thể hoạt động ổn định với độ phân giải cao, phù hợp cho việc in mẫu một số sản

phẩm ứng dụng trong thực tế và mô hình chi tiết. Thiết bị có khả năng ứng dụng trong đào tạo kỹ thuật, nghiên cứu và sản xuất mô hình kỹ thuật. ❖

Ngày nhận bài: **03/7/2025**

Ngày phản biện: **18/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Hull, C. W. (1986), “*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography (U.S. Patent No. 4,575,330)*”. U.S. Patent and Trademark Office.
- [2]. Crump, S. S. (1992), “*Apparatus and method for creating three-dimensional objects (U.S. Patent No. 5,121,329)*”. U.S. Patent and Trademark Office.
- [3]. He, Y., Wu, Y., Fu, J. Z., Gao, Q., & Qiu, J. J. (2014), “*Developments of 3D printing microfluidics and applications in chemistry and biology: A review*”. Electrophoresis, 35(17), 2546-2557.
- [4]. Zhengbo Zhu (2023), “*Freeform Optics for Achieving Collimated and Uniform Light Distribution in LCD-Type UV-Curable 3D Printing*”.
- [5]. Li, Z., & Sun, Y. (2023), “*Mechanical Performance of Resin-Based 3D Printed Parts*”. Materials Science Forum - Nghiên cứu về độ bền cơ học và ảnh hưởng của các yếu tố thiết kế lên sản phẩm in.
- [6]. Ngô Diệu Thạch (2016), “*Nghiên cứu thiết kế máy in 3D SLA DLP*”. Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
- [7]. Phùng Xuân Lan, Đỗ Thọ Trường (2023), “*Thiết kế và chế tạo máy in sinh học 3D tích hợp để đặt nền móng cho các nghiên cứu công nghệ mô tại Việt Nam*”. Đại học Bách Khoa Hà Nội, Trung tâm Nghiên cứu in 3D Y sinh tại Trường VinUni.
- [8]. PGS,TS. Bùi Minh Trí (2005), “*Xác suất thống kê và quy hoạch thực nghiệm*”. NXB. Khoa học Kỹ thuật.

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU KIẾN TRÚC MẠNG NƠ RON VỚI THUẬT TOÁN TOÁN DI TRUYỀN NSGA-II, ỨNG DỤNG TRONG BÀI TOÁN DỰ ĐOÁN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT SAU KHI TIỆN CNC VỚI THÉP SUM24L

A RESEARCH ON NEURAL NETWORK ARCHITECTURE OPTIMIZATION USING THE NSGA-II GENETIC ALGORITHM FOR SURFACE ROUGHNESS PREDICTION IN CNC TURNING OF SUM24L STEEL

TS. Nguyễn Duy Anh, ThS. Nguyễn Thị Hiếu Thảo*

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: hieuthaont@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Độ nhám bề mặt sau khi gia công là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến độ bền, ma sát và tính năng vận hành của chi tiết cơ khí. Trong bối cảnh gia công thép SUM24L bằng phương pháp tiện, việc dự đoán chính xác độ nhám bề mặt từ các thông số cắt như tốc độ (v), chiều sâu (t) và lượng chạy dao (s) là cần thiết để tối ưu hóa quy trình và nâng cao chất lượng sản phẩm. Tuy nhiên, các mô hình dự đoán hiện tại thường thiếu cân bằng giữa độ chính xác và khả năng triển khai thực tế trong môi trường sản xuất thông minh. Bài báo này đề xuất một phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu dựa trên NSGA-II nhằm tự động thiết kế các mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) cho bài toán dự đoán độ nhám sau tiện thép SUM24L. Hai mục tiêu được xem xét đồng thời là: (1) sai số dự đoán (MSE) và (2) kích thước mô hình sau lượng tử hóa (bytes). Thử nghiệm cho thấy phương pháp đã tạo ra một tập nghiệm Pareto hiệu quả, cung cấp các phương án mô hình ANN linh hoạt, sẵn sàng triển khai trên thiết bị biên với độ chính xác phù hợp yêu cầu công nghiệp.

Từ khóa: Độ nhám bề mặt; Mạng Nơ-ron nhân tạo; Tối ưu hóa đa mục tiêu; Thiết bị biên.

ABSTRACT

Surface roughness after machining is a key factor affecting the durability, friction, and operational performance of mechanical parts. In the context of turning SUM24L steel, the accurate prediction of surface roughness from cutting parameters such as speed (v), depth of cut (t), and feed rate (s) is necessary to optimize the process and enhance product quality. However, current prediction models often lack a balance between accuracy and practical deployment capability in smart manufacturing environments. This paper proposes a multi-objective optimization method based on NSGA-II to automatically design Artificial Neural Network (ANN) models for the problem of predicting surface roughness after turning SUM24L steel. Two objectives are considered simultaneously: (1) prediction error (MSE) and (2) post-quantization model size (bytes). Experiments show that the method has generated an effective Pareto front, providing flexible ANN model options, ready for deployment on edge devices with an accuracy suitable for industrial requirements.

Keywords: Surface roughness; Artificial Neural Network; Multi-objective Optimization; Edge devices. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong lĩnh vực cơ khí chế tạo, chất lượng bề mặt là một chỉ tiêu quan trọng, phản ánh trực tiếp mức độ hoàn thiện của quá trình gia công. Đặc biệt, độ nhám bề mặt (Ra) có ảnh hưởng lớn đến các đặc tính chức năng của chi tiết như khả năng chống mài mòn, chống ăn mòn, hệ số ma sát và độ bền mỏi. Việc kiểm soát độ nhám là yêu cầu thiết yếu để đảm bảo hiệu năng và tuổi thọ của sản phẩm, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao.

Tuy nhiên, độ nhám sau gia công chịu ảnh hưởng bởi nhiều thông số công nghệ như tốc độ cắt (v), chiều sâu cắt (t) và lượng chạy dao (s), với mối quan hệ phi tuyến và khó mô hình hóa tường minh. Do đó, khả năng dự đoán trước độ nhám từ các thông số cắt không chỉ giúp rút ngắn thời gian thử nghiệm mà còn tiết kiệm vật liệu và chi phí sản xuất.

Nhiều phương pháp đã được đề xuất để giải quyết bài toán này, từ mô hình thực nghiệm tuyến tính đến phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Method – RSM). Gần đây, các kỹ thuật học máy – đặc biệt là mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Network – ANN) – đã được áp dụng và cho thấy nhiều tiềm năng nhờ khả năng mô hình hóa các quan hệ phi tuyến phức tạp. Tuy nhiên, các mô hình ANN đạt độ chính xác cao thường có kích thước lớn, đòi hỏi nhiều tài nguyên tính toán, dẫn đến khó khăn trong việc triển khai thực tế trên các thiết bị giám sát phân tán hoặc hệ thống điều khiển tại xưởng, vốn yêu cầu độ trễ thấp và dung lượng nhỏ.

Bài báo này đề xuất một phương pháp mới nhằm giải quyết đồng thời hai mục tiêu quan trọng trong thiết kế mô hình ANN cho bài toán dự đoán độ nhám bề mặt sau khi tiện

thép SUM24L: (1) giảm sai số dự đoán và (2) giảm kích thước mô hình sau khi áp dụng kỹ thuật lượng tử hóa hậu huấn luyện (Post-Training Quantization). Phương pháp được xây dựng dựa trên thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu NSGA-II, cho phép tự động tìm kiếm tập hợp các kiến trúc ANN Pareto tối ưu về cả hai khía cạnh nêu trên. Đây là hướng tiếp cận phù hợp với yêu cầu triển khai thực tế trong môi trường sản xuất thông minh theo định hướng Công nghiệp 4.0. Cấu trúc của bài báo như sau: Phần 2 trình bày tổng quan các công trình liên quan. Phần 3 mô tả quy trình tối ưu hóa đề xuất. Phần 4 trình bày kết quả thực nghiệm và phân tích. Cuối cùng, Phần 5 đưa ra kết luận và hướng phát triển trong tương lai.

2. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Các mô hình dự đoán độ nhám bề mặt

Dự đoán độ nhám bề mặt từ các thông số cắt là một chủ đề được nghiên cứu rộng rãi trong lĩnh vực gia công cơ khí. Các phương pháp thống kê truyền thống như RSM và phương pháp Taguchi đã được sử dụng để xây dựng mô hình thực nghiệm giữa các biến đầu vào và đầu ra. Mặc dù có ưu điểm về tính đơn giản và khả năng giải thích, các mô hình này thường giả định tuyến tính hoặc gần tuyến tính, dẫn đến hạn chế trong việc mô hình hóa các mối quan hệ phi tuyến đặc trưng trong quá trình cắt gọt kim loại.

Để khắc phục điểm yếu này, các kỹ thuật học máy và trí tuệ nhân tạo đã được ứng dụng nhằm nâng cao khả năng dự đoán. Trong số đó, các mô hình như mạng ANN, máy vector hỗ trợ SVM, và hệ suy luận thích nghi neuro-mờ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – ANFIS) [1] đã cho thấy hiệu quả vượt trội. Trong các nghiên cứu gần đây, ANN nổi lên

như một công cụ phổ biến do khả năng học phi tuyến mạnh mẽ, đặc biệt phù hợp với dữ liệu gia công có tính nhiễu và biến động cao [2].

2.2. Tối ưu hóa đa mục tiêu và NSGA-II

Trong nhiều bài toán kỹ thuật, bao gồm cả thiết kế mô hình dự đoán, việc tối ưu đồng thời nhiều mục tiêu – chẳng hạn như độ chính xác và độ phức tạp của mô hình – là yêu cầu phổ biến. Tối ưu hóa đa mục tiêu (Multi-Objective Optimization – MOO) là cách tiếp cận cho phép xử lý các mục tiêu mâu thuẫn bằng cách tìm ra một tập nghiệm không bị chi phối lẫn nhau, tạo nên mặt phẳng Pareto tối ưu.

Trong số các thuật toán tiến hóa phục vụ MOO, NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) là một trong những thuật toán nổi bật nhờ khả năng hội tụ nhanh, phân tán nghiệm tốt trên biên Pareto và chi phí tính toán hợp lý [3]. NSGA-II đã được áp dụng hiệu quả trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật như thiết kế mạch, điều khiển hệ thống và tối ưu kiến trúc mạng nơ-ron.

2.3. Nén mô hình và lượng tử hóa cho thực thi trí tuệ nhân tạo trên các thiết bị biên

Trong bối cảnh sản xuất thông minh, các mô hình học máy không chỉ cần chính xác mà còn phải đủ nhẹ để triển khai trên các thiết bị biên hoặc các hệ thống giám sát nhúng. Việc nén mô hình trở thành một yêu cầu thiết yếu nhằm giảm độ trễ, tiết kiệm năng lượng và giảm chi phí phần cứng.

Trong số các kỹ thuật nén, lượng tử hóa là một phương pháp phổ biến và hiệu quả, cho phép chuyển đổi mô hình từ định dạng số thực 32-bit sang các định dạng số nguyên 16-bit hoặc 8-bit mà không làm suy giảm đáng kể độ

chính xác. Điều này giúp giảm kích thước mô hình và tăng tốc độ suy luận [4]. Các nền tảng như TensorFlow Lite đã hỗ trợ mạnh mẽ cho lượng tử hóa sau huấn luyện, giúp triển khai dễ dàng các mô hình nén trên thiết bị thực.

2.4. Đóng góp của nghiên cứu

Mặc dù đã có các nghiên cứu riêng lẻ ứng dụng ANN trong dự đoán độ nhám bề mặt, hoặc sử dụng NSGA-II để tối ưu các tham số mô hình, hiện chưa có công trình nào kết hợp một cách hệ thống hai hướng tiếp cận này để giải quyết bài toán tối ưu đồng thời độ chính xác và kích thước mô hình sau lượng tử hóa, đặc biệt trong bối cảnh gia công thép SUM24L. Nghiên cứu đề xuất một quy trình tự động thiết kế và nén các mô hình ANN dựa trên NSGA-II, từ đó tạo ra các mô hình Pareto tối ưu có thể triển khai trực tiếp trong hệ thống sản xuất thông minh.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Thu thập và tiền xử lý dữ liệu

Bộ dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu được thu thập từ quá trình tiện thực nghiệm thép SUM24L (chi tiết đã được trình bày trong công trình trước đây của nhóm tác giả). Tập dữ liệu bao gồm 27 mẫu, mỗi mẫu tương ứng với một tổ hợp thông số cắt và kết quả đo độ nhám bề mặt tại 5 vị trí khác nhau. Cụ thể:

- Đầu vào: Ba thông số công nghệ gồm tốc độ cắt v (m/min), chiều sâu cắt t (mm) và lượng chạy dao s (mm/rev).
- Đầu ra: Năm giá trị độ nhám bề mặt Ra_1 đến Ra_5 (μm).
- Dữ liệu được chia thành hai tập: 80% cho huấn luyện và 20% cho kiểm thử. Các đặc trưng đầu vào được chuẩn hóa và đưa về dạng



phân phối chuẩn, giúp tăng độ ổn định trong huấn luyện mạng nơ-ron.

3.2. Quy trình tối ưu hóa đề xuất

Quy trình tối ưu hóa là bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu, và được giải quyết bằng thuật toán NSGA-II. Mỗi cá thể trong quần thể được biểu diễn bằng một vector số thực, mã hóa cho cá thể. Mỗi cá thể bao gồm cấu trúc mạng nơ-ron (như số lớp ẩn, số nơ-ron trên mỗi lớp, loại hàm kích hoạt) và chiến lược lượng tử hóa tương ứng (ví dụ: số bit lượng tử hóa, kỹ thuật ánh xạ). Quần thể ban đầu được khởi tạo ngẫu nhiên và sau đó tiến hóa qua các thế hệ theo cơ chế chọn lọc tự nhiên. Trong mỗi thế hệ, các cá thể được giải mã để xây dựng mô hình ANN cụ thể, mô hình này được huấn luyện trên tập dữ liệu huấn luyện và tiếp tục được lượng tử hóa bằng kỹ thuật lượng tử hóa sau huấn luyện sử dụng TensorFlow Lite.

Sau khi lượng tử hóa, hiệu năng của từng cá thể được đánh giá dựa trên hai mục tiêu cạnh tranh: độ chính xác dự đoán và độ nhỏ gọn của mô hình. Độ chính xác được định lượng thông qua Sai số Trung bình bình phương (Mean Squared Error – MSE) trên tập dữ liệu kiểm thử độc lập, trong khi độ nhỏ gọn được đo bằng kích thước của tệp mô hình sau lượng tử hóa. Các giá trị mục tiêu của toàn bộ quần thể được truyền lại cho thuật toán NSGA-II, nơi chúng được xử lý thông qua cơ chế sắp xếp không chi phối và tính toán khoảng cách chen chúc để chọn lọc cá thể cha mẹ. Các cá thể con sau đó được tạo ra bằng các toán tử lai ghép và đột biến. Quá trình lặp tiếp tục cho đến khi đạt đến điều kiện dừng định trước, chẳng hạn như số thế hệ tối đa hoặc sự hội tụ của tập nghiệm Pareto.

3.2.1. Định nghĩa bài toán tối ưu

Bài toán tối ưu hóa trong nghiên cứu này được phát biểu dưới dạng tối ưu hóa đa mục tiêu với hai hàm mục tiêu cần được đồng thời cực tiểu hóa. Cụ thể, bài toán có dạng:

$$\min_x F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]$$

Trong đó, $\mathbf{x}$ là một vector quyết định, đại diện cho một cấu hình tiềm năng của mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) và chiến lược lượng tử hóa tương ứng. Hàm mục tiêu $F(\mathbf{x})$ bao gồm hai thành phần: $f_1(\mathbf{x})$ là sai số trung bình bình phương (Mean Squared Error – MSE) của mô hình trên tập dữ liệu kiểm thử, phản ánh mức độ chính xác trong dự đoán.

- $f_2(\mathbf{x})$ là kích thước mô hình sau lượng tử hóa, được đo bằng số byte, biểu thị độ nhỏ gọn của mô hình và mức tiêu tốn bộ nhớ lưu trữ.

Không gian tìm kiếm của bài toán được xác định bởi các giá trị khả dĩ của vector quyết định ($\mathbf{x}$) bao gồm: (i) các siêu tham số kiến trúc của mạng nơ-ron, cụ thể là số lượng lớp ẩn (giới hạn từ 1 đến 3 lớp) và số lượng nơ-ron trong mỗi lớp (chọn từ các giá trị trong khoảng từ 8 đến 128, là bội số của 8); và (ii) mức lượng tử hóa, được lựa chọn từ ba mức độ độ chính xác: 8-bit, 16-bit hoặc 32-bit. Các ràng buộc này tạo thành một không gian tìm kiếm rời rạc nhưng có thể mã hóa hiệu quả trong khuôn khổ của thuật toán tiến hóa. Mục tiêu cuối cùng là xác định tập hợp các nghiệm không chi phối (Pareto-optimal solutions), thể hiện sự đánh đổi hợp lý giữa độ chính xác dự đoán và độ nhỏ gọn của mô hình.

3.2.2. Cấu hình thuật toán NSGA-II

Thuật toán NSGA-II trong nghiên cứu được triển khai bằng thư viện pymoo, một công

cụ tối ưu hóa đa mục tiêu mã nguồn mở mạnh mẽ và linh hoạt. Cấu hình thuật toán được thiết lập nhằm đảm bảo khả năng khám phá không gian tìm kiếm hiệu quả và đạt được tập nghiệm Pareto ổn định sau số thế hệ giới hạn.

Cụ thể, kích thước quần thể được đặt là 30 cá thể, nhằm duy trì đa dạng di truyền trong khi vẫn đảm bảo chi phí tính toán hợp lý. Quá trình tiến hóa được thực hiện trong 25 thế hệ, đủ để cho phép thuật toán hội tụ đến một tập nghiệm không chi phối có chất lượng.

Trong quá trình tạo sinh thế hệ mới, toán tử lai ghép được sử dụng là Simulated Binary Crossover (SBX) với hệ số phân phối $\eta = 15$ và xác suất lai ghép là 0.9, nhằm khai thác hiệu quả thông tin từ các cá thể cha mẹ. Toán tử đột biến được áp dụng dưới dạng Polynomial Mutation với hệ số $\eta = 15$, và xác suất đột biến được thiết lập tự động theo số lượng biến trong vector quyết định, đảm bảo mức độ nhiễu vừa đủ để duy trì khả năng khám phá.

Chiến lược chọn lọc cá thể dựa trên cơ chế chọn lọc giải đấu (Tournament Selection) kết hợp với thuật toán sắp xếp không chi phối và tính khoảng cách chen chúc của NSGA-II tiêu chuẩn. Cấu hình này cho phép thuật toán duy trì cân bằng giữa khả năng khai thác (exploitation) và khám phá (exploration) trong quá trình tối ưu hóa đa mục tiêu.

3.2.3. Huấn luyện và lượng tử hóa mạng nơ-ron

Quá trình huấn luyện mạng nơ-ron được thực hiện bằng thư viện Keras, sử dụng thuật toán tối ưu Adam và hàm mất mát là sai số trung bình bình phương (Mean Squared Error – MSE). Để ngăn ngừa hiện tượng quá khớp chiến lược dừng sớm được áp dụng, theo

dôi sai số trên tập kiểm thử và tự động dừng huấn luyện khi hiệu suất không còn cải thiện sau một số epoch liên tiếp.

Sau khi hoàn tất huấn luyện, mô hình được chuyển đổi sang định dạng TensorFlow Lite (TFLite) bằng công cụ TFLiteConverter. Quá trình chuyển đổi này đồng thời áp dụng kỹ thuật lượng tử hóa sau huấn luyện (post-training quantization) với ba mức độ được hỗ trợ: 8-bit integer, 16-bit float, và giữ nguyên độ chính xác 32-bit float. Các mức lượng tử hóa này tạo điều kiện thuận lợi cho việc đánh đổi giữa độ chính xác của mô hình và độ nhỏ gọn khi triển khai trên các thiết bị đầu cuối có tài nguyên hạn chế.

4. KẾT QUẢ DỰ ĐOÁN

4.1. Kết quả về các giải pháp Pareto tối ưu

Hình 1 trình bày biểu đồ Pareto Front hai chiều thể hiện mối quan hệ giữa kích thước mô hình (tính theo kilobyte, trục hoành) và sai số dự đoán MSE (trục tung). Mỗi điểm trên đồ thị biểu diễn một giải pháp nằm trên biên Pareto – nghĩa là không tồn tại giải pháp nào khác có thể đồng thời cải thiện cả độ chính xác và mức tiêu tốn tài nguyên.



Hình 1. Biểu đồ Pareto Front 2D: Sai số dự đoán (MSE) so với kích thước mô hình (KB)

Nhằm làm rõ hơn đặc điểm các chiến lược thiết kế, Bảng 1 tổng hợp ba giải pháp đại diện cho ba khuynh hướng đối lập: mô hình có độ chính xác cao nhất, mô hình nhỏ gọn nhất, và một giải pháp cân bằng hợp lý giữa hai tiêu chí.

Bảng 1. Tóm tắt các giải pháp Pareto-tối ưu tiêu biểu

Giải pháp	MSE	Kích thước (KB)	Kiến trúc (số nơ-ron mỗi lớp)	Số tham số
Chính xác nhất	0.035496	6.52	[40, 16, 40]	293
Gọn nhẹ nhất	0.958995	2.19	[8]	29
Cân bằng	0.240387	3.34	[8, 24]	101

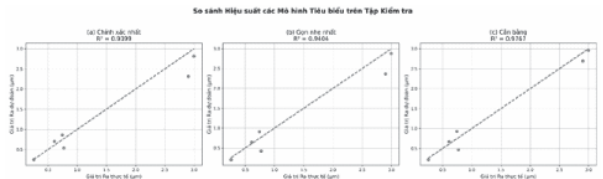
Kết quả trên Hình 1 phản ánh rõ rệt đặc trưng đánh đổi giữa độ chính xác và độ phức tạp mô hình. Cụ thể, mô hình chính xác nhất có sai số thấp nhất ($MSE = 0.035$) nhưng đòi hỏi kích thước bộ nhớ lớn hơn ba lần so với mô hình nhỏ gọn nhất. Ngược lại, mô hình gọn nhẹ nhất chỉ tiêu tốn 2.19 KB, nhưng độ chính xác suy giảm đáng kể với MSE lên đến gần 1.0. Giải pháp cân bằng có sai số vừa phải ($MSE = 0.240$) trong khi vẫn duy trì kích thước ở mức tiết kiệm (3.34 KB), cho thấy đây là một phương án thực tiễn cho các hệ thống nhúng hoặc thiết bị có hạn chế về tài nguyên phần cứng.

Từ các kết quả trên, có thể khẳng định rằng không tồn tại một mô hình “tốt nhất tuyệt đối”, mà việc lựa chọn kiến trúc phù hợp phụ thuộc vào bối cảnh ứng dụng: ưu tiên độ chính xác (ví dụ, hệ thống kiểm tra chất lượng trong công nghiệp) hay ưu tiên dung lượng bộ nhớ và tốc độ (ví dụ, thiết bị IoT biên hoặc cảm biến thông minh).

4.2. Kết quả phân tích dự đoán với các mô hình tiêu biểu

Để đánh giá sâu hơn hiệu năng dự đoán của các giải pháp Pareto-tối ưu, ba mô hình tiêu biểu được chọn gồm: (A) Chính xác nhất, (B) Nhỏ gọn nhất, và (C) Cân bằng nhất.

Mỗi mô hình được huấn luyện và áp dụng để dự đoán giá trị độ nhám bề mặt Ra trên tập kiểm tra (test set). Kết quả được trực quan hóa dưới dạng biểu đồ Dự đoán so với Thực tế. Đây là một công cụ trực quan quan trọng để đánh giá khả năng khái quát hóa và độ chính xác tuyệt đối của mô hình. Trên mỗi biểu đồ, hệ số xác định R^2 được tính và hiển thị để đo lường mức độ khớp giữa đầu ra mô hình và dữ liệu thật.



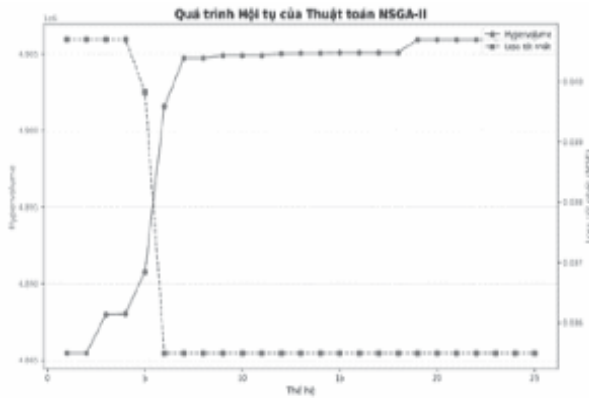
Hình 2. Biểu đồ dự đoán với thực tế trên tập kiểm tra cho ba mô hình tiêu biểu.

Ba biểu đồ trong Hình 2 cho thấy rõ sự đánh đổi giữa độ chính xác và độ phức tạp của mô hình. Mô hình (A) có hiệu năng tốt nhất nhưng chi phí tài nguyên cao, mô hình (B) cực kỳ nhỏ gọn nhưng chính xác vừa phải, trong khi mô hình (C) cung cấp giải pháp dung hòa với hiệu năng tốt và tài nguyên hợp lý. Lựa chọn giữa ba mô hình cần dựa vào ràng buộc cụ thể của từng ứng dụng – ví dụ, hệ thống biên yêu cầu nhẹ, hay hệ thống kiểm tra chất lượng yêu cầu độ chính xác cao.

4.3. Đánh giá quá trình hội tụ của thuật toán

Hình 3 trình bày tiến trình hội tụ của thuật toán NSGA-II thông qua ba chỉ số đặc

trung được ghi nhận trong suốt quá trình tiến hóa: giá trị Hypervolume, MSE tối ưu và số lượng cá thể nằm trên Pareto front tại mỗi thế hệ.



Hình 3. Quá trình hội tụ của thuật toán NSGA-II

Kết quả cho thấy Hypervolume tăng đều theo thời gian, phản ánh sự cải thiện liên tục về cả chất lượng lẫn độ đa dạng của tập nghiệm Pareto. Mức tăng nhanh trong giai đoạn đầu cho thấy thuật toán khởi đầu hiệu quả và nhanh chóng xác định được các vùng tiềm năng trong không gian tìm kiếm. Song song đó, MSE tối ưu có xu hướng giảm dần, chứng tỏ thuật toán dần tiếp cận các nghiệm có sai số dự đoán thấp hơn. Quá trình giảm diễn ra ổn định, đặc biệt rõ rệt trong các thế hệ đầu, trước khi hội tụ dần về giá trị tiệm cận.

Tổng thể, Hình 3 cung cấp bằng chứng thực nghiệm về khả năng tối ưu hóa bền vững và hiệu quả của thuật toán NSGA-II. Việc đồng thời cải thiện ba chỉ số trên trong suốt quá trình tiến hóa là dấu hiệu cho thấy sự cân bằng hợp lý giữa hai yếu tố cốt lõi trong thuật toán tiến hóa: khai phá không gian nghiệm và khai thác các vùng tối ưu cục bộ. Điều này củng cố độ tin cậy của tập nghiệm Pareto thu được và là cơ sở cho các phân tích chi tiết đã trình bày trong các mục trước.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày một phương pháp luận hệ thống nhằm tự động hóa quá trình thiết kế các mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) tối ưu cho bài toán dự đoán độ nhám bề mặt. Bằng cách mô hình hóa bài toán như một bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu và áp dụng thuật toán NSGA-II, quy trình đề xuất cho phép đồng thời tìm kiếm các cấu hình mạng hiệu quả cả về độ chính xác và độ nhỏ gọn, phù hợp với các yêu cầu triển khai trong thực tế.

Các kết quả thực nghiệm cho thấy rằng phương pháp đề xuất đã thành công trong việc tạo ra một tập hợp các nghiệm Pareto-tối ưu, thể hiện rõ ràng mối quan hệ đánh đổi giữa sai số dự đoán và kích thước mô hình sau lượng tử hóa. Ngoài ra, một số cấu hình tiêu biểu đã được xác định, đại diện cho các lựa chọn khả thi cho các mục tiêu ứng dụng khác nhau: từ độ chính xác cao đến triển khai gọn nhẹ trên thiết bị nhúng.

Về mặt thực tiễn, phương pháp này cung cấp một công cụ hữu ích và có khả năng mở rộng cho các kỹ sư và nhà nghiên cứu trong lĩnh vực sản xuất thông minh. Việc tích hợp quy trình tối ưu hóa tự động với lượng tử hóa mô hình giúp rút ngắn thời gian phát triển, đồng thời đảm bảo hiệu suất mô hình phù hợp với các ràng buộc phần cứng trong môi trường công nghiệp.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn tồn tại một số hạn chế. Bộ dữ liệu sử dụng trong huấn luyện có quy mô tương đối nhỏ và chỉ bao gồm ba thông số đầu vào cơ bản, chưa phản ánh đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng trong quá trình gia công. Trong các nghiên cứu tiếp theo, có thể mở rộng bộ dữ liệu với nhiều điều kiện vận

hành hơn (như độ mòn dao, mức rung động), đồng thời khám phá các kiến trúc mạng tiên tiến hơn như LSTM hoặc Transformer để cải thiện khả năng mô hình hóa. Bên cạnh đó, việc đánh giá hiệu năng triển khai thực tế của các mô hình đã lượng tử hóa trên phần cứng cụ thể (ví dụ: thời gian suy luận, mức tiêu thụ năng lượng) cũng là một hướng phát triển quan trọng nhằm đảm bảo tính khả thi khi ứng dụng trong môi trường sản xuất thực.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2025-DT-007.

(*) Tác giả liên hệ: Nguyễn Thị Hiếu Thảo (email: hieuthaont@utc.edu.vn)❖

Ngày nhận bài: **23/6/2025**

Ngày phản biện: **07/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Asiltürk, İlhan, and Mehmet Çunkaş, “*Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method*”. Expert systems with applications 38.5 (2011): 5826-5832.
- [2]. Zain, Azlan Mohd, Habibollah Haron, and Safian Sharif, “*Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network*”. Expert Systems with Applications 37.2 (2010): 1755-1768.
- [3]. Deb, Kalyanmoy, et al., “*A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*”. IEEE transactions on evolutionary computation 6.2 (2002): 182-197.
- [4]. Jacob, Benoit, et al., “*Quantization and training of neural networks for efficient integer-arithmetic-only inference*”. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018.

ỨNG DỤNG THỰC NGHIỆM ĐỂ ĐÁNH GIÁ KHUYẾT TẬT MỐI HÀN THÂN, VỎ TÀU THỦY BẰNG PHƯƠNG PHÁP SIÊU ÂM

EXPERIMENTAL APPLICATION TO ASSESS DEFECTS IN SHIP HULL AND HULL WELDINGS BY ULTRASONIC METHOD

ThS. Nguyễn Tiến Dũng

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: dungnt@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện nay, nước ta đang ứng dụng khoa học công nghệ rất mạnh mẽ. Bên cạnh việc sản xuất tạo ra các sản phẩm thì việc kiểm tra, đánh giá chất lượng sản phẩm là việc làm rất cần thiết trước khi đưa vào sử dụng.

Trong đó, phương pháp siêu âm xung phản hồi được ứng dụng rất rộng rãi để phát hiện tách lớp và phát hiện khuyết tật trong mối hàn và các kết cấu kim loại. Nhờ ưu điểm như nhanh, chính xác, thiết bị tương đối rẻ, và có thể cho ta biết cả chiều sâu của khuyết tật. Mục đích của bài báo này là minh họa và mô tả khuyết tật hàn điển hình bằng siêu âm đồng thời làm rõ hơn những ưu điểm nhanh, rẻ, độ tin cậy của phương pháp.

Từ khóa: Mối hàn; Khuyết tật; Kiểm tra; Sản phẩm.

ABSTRACT

Currently, our country is applying science and technology very strongly. Besides manufacturing products, testing and evaluating product quality is very necessary before putting them into use.

In particular, the ultrasonic pulse echo method is widely used to detect delamination and detect defects in welds and metal structures. Thanks to its advantages such as fast, accurate, relatively cheap equipment, and can tell us the depth of the defect. The purpose of this article is to illustrate and describe typical welding defects by ultrasound and at the same time clarify the advantages of speed, cheapness, and reliability of the method.

Keywords: Weld; Defect; Inspection; Product.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành tàu thủy ngày càng phát triển cùng với nhu cầu thông thương các cảng trên thế giới ngày càng cao. Có thể nói thân vỏ tàu thủy là một phần quan trọng của tàu thủy và nó dễ xảy ra các khuyết tật trên bề mặt nhất, từ đó gây ra mất an toàn. Phương pháp kiểm tra không phá hủy đóng một vai trò quan trọng trong việc kiểm tra chất lượng sản phẩm. Vì vậy, cần phải có phương pháp kiểm tra không phá hủy để phát hiện sớm các khuyết tật và đánh giá xem thân, vỏ tàu có an toàn để sử dụng hay không. Trong đó, phương pháp siêu âm xung phản hồi được ứng dụng rất rộng rãi để đo chiều dày vật liệu, đánh giá ăn mòn, phát hiện tách lớp và phát hiện khuyết tật trong mối hàn và các kết cấu kim loại. Nhờ ưu điểm như nhanh, chính xác, thiết bị tương đối rẻ, và có thể cho ta biết cả chiều sâu của khuyết tật [1], [3].

Phương pháp kiểm tra siêu âm là sử dụng chùm sóng âm tần số cao truyền vào vùng vật liệu cần kiểm tra. Nếu không có khuyết tật, chùm sóng siêu âm sẽ đi thẳng và chỉ có phản xạ tại bề mặt đáy của vật liệu. Nếu có khuyết tật, chùm sóng siêu âm sẽ phản xạ ngược trở lại tại vị trí có khuyết tật.

Với sự giúp sức mạnh mẽ của thiết bị điện tử và các phần mềm được lập trình sẵn, việc xác định vị trí khuyết tật rất dễ dàng dựa vào thời gian sóng âm di chuyển trong vật liệu và vận tốc sóng âm của vật liệu đó. Dựa vào độ mạnh yếu của chùm sóng âm phản hồi, ta cũng có thể đánh giá được kích thước khuyết tật [3].

2. CƠ SỞ THỰC NGHIỆM

2.1. Thiết bị dò khuyết tật bằng siêu âm Masterscan D70 do hãng SONATEST

- Lựa chọn đầu dò

Việc lựa chọn đầu dò góc là một vấn đề quan trọng nhằm nhận được thông tin nhiều nhất trong một thời gian ngắn nhất của bất cứ quá trình kiểm tra nào.

- Lựa chọn chất tiếp âm và dụng cụ quét tiếp âm

Chất tiếp âm hay môi trường tiếp âm cần được sử dụng giữa đầu dò và vật kiểm tra để cải thiện việc truyền năng lượng sóng siêu âm nhằm loại bỏ không khí lọt vào giữa đầu dò và bề mặt mẫu kiểm tra.

- Tiêu chuẩn áp dụng

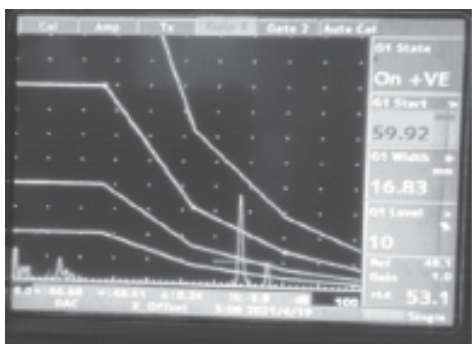
ASME (American Society of Mechanical Engineering – Liên đoàn Kỹ sư Cơ khí Hoa Kỳ) [5].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

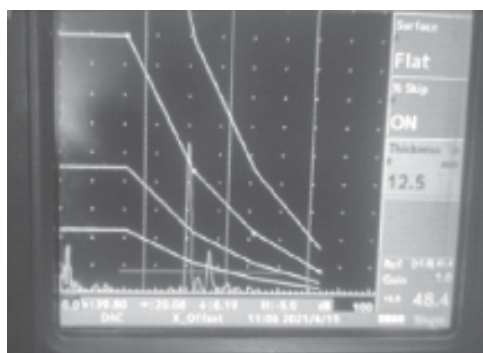
3.1. Đánh giá kết quả

Phương pháp siêu âm cần phân biệt được các tín hiệu hiển thị trên màn hình thiết bị là tín hiệu liên quan hoặc tín hiệu không liên quan.

Tín hiệu liên quan: các tín hiệu phản ánh về khuyết tật như nứt, xỉ, rỗ khí, không thấu, không ngấu; tín hiệu không liên quan: các tín hiệu phản ánh nhiễu bề mặt, giọt lồi đáy và mũ gia cường phản xạ hoặc chuyển đổi dạng sóng.



Hình 3.1. Tín hiệu hiển thị nhiều bề mặt



Hình 3.2. Tín hiệu hiển thị thiếu ngẫu

Hình 3.1 hiển thị tín hiệu của khuyết tật, có thể xác định được: Loại khuyết tật, độ sâu của bất liên tục, khoảng cách với đầu dò, kích thước khuyết tật.

Qua đó, có thể xác nhận khuyết tật nào được chấp nhận và khuyết tật nào không được chấp nhận thông qua các tiêu chuẩn đánh giá về khuyết tật của ASME [5].

Tiêu chuẩn áp dụng cho phương pháp kiểm tra siêu âm có nội dung như sau:

Đối với các kỹ thuật dựa trên biên độ, vị trí, biên độ và phạm vi của tất cả các bề mặt phản xạ có biên độ xung lớn hơn 20% mức tham chiếu sẽ được điều tra chi tiết.

Hình 3.2, các bất liên tục được đánh giá là những vết nứt, thiếu ngẫu, hoặc thiếu thấu là

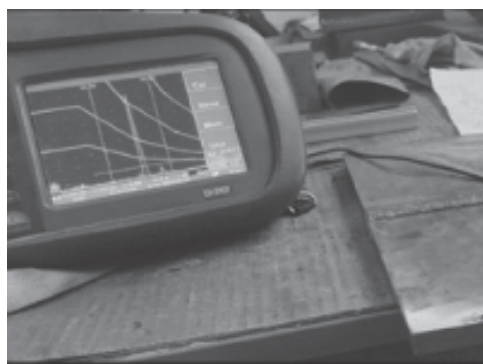
không thể chấp nhận được và không cần đánh giá dựa trên chiều dài.

Ngoài ra, đối với các bất liên tục bao gồm xỉ bên trong, rỗ khí hoặc chỉ thị tuyến tính thì đánh giá như sau: Với T_w là bề dày mỗi hàn (trong trường hợp, mỗi hàn giữa hai ống có bề dày khác nhau thì T_w được lấy bằng với giá trị bề dày nhỏ hơn). Các bất liên tục có chiều dài vượt quá mức sau đây thì không được chấp nhận:

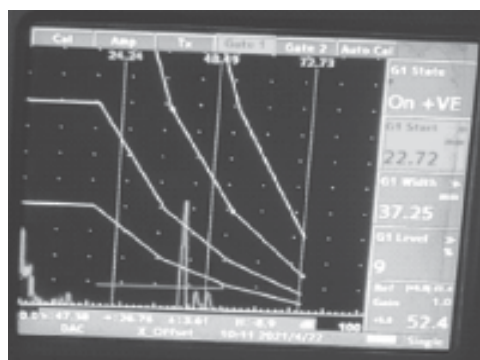
6mm (1/4in) cho bề dày $T_w < 19$ mm (3/4 inch).

$T_w/3$ cho bề dày 19 mm (3/4in) $< T_w < 57$ mm (2 1/4 inch).

19 mm (3/4 inch) cho bề dày $T_w > 57$ mm (2 1/4 inch).

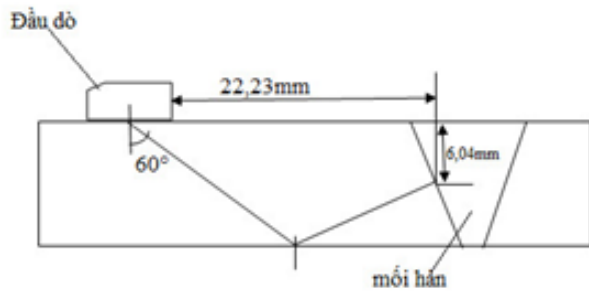


Hình 3.3. Màn hình hiển thị tín hiệu cho mỗi hàn tâm

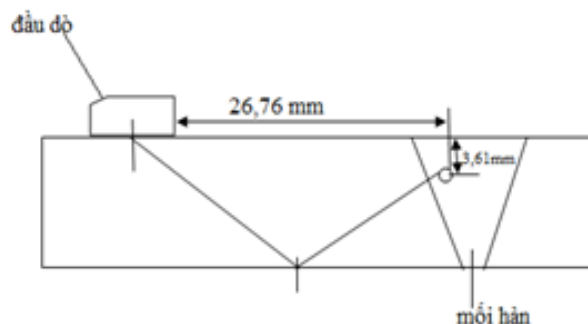


Hình 3.4. Màn hình hiển thị tín hiệu cho mỗi hàn ống





Hình 3.5. Biểu diễn hình học sơ đồ truyền âm



Hình 3.6. Biểu diễn hình học sơ đồ truyền âm

Đối với hàn phẳng, sau khi quét một lượt dọc theo đường mối hàn, bắt liên tục được thiết bị ghi nhận như hình 3.3.

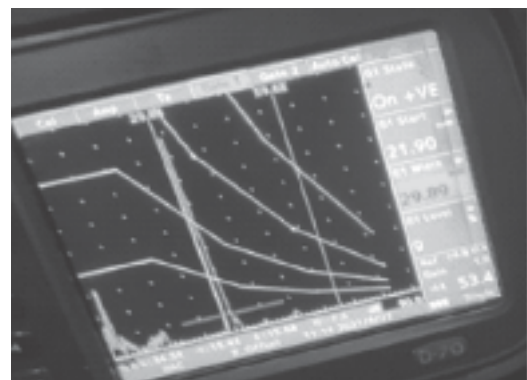
Dựa vào thông tin trên màn hình hiển thị, bắt liên tục nằm ở độ sâu 6,04 mm so với bề mặt mối hàn và cách đầu dò một khoảng 22,23 mm. Đầu dò được sử dụng là đầu dò góc với góc khúc xạ là 60°. Từ những thông tin trên có thể biểu diễn sơ đồ hình học đường truyền của sóng âm bên trong vật liệu.

Khi biểu diễn dưới dạng sơ đồ hình học có thể xác định được vị trí của khuyết tật nằm ở vách mối hàn bên trái và đây là dạng khuyết tật thiếu ngấu. Biên độ xung phản hồi tại vị trí này vượt trên 20 % so với mức quy chuẩn nên theo tiêu chuẩn ASME thì mối hàn này sẽ bị loại bỏ và hàn lại [5].

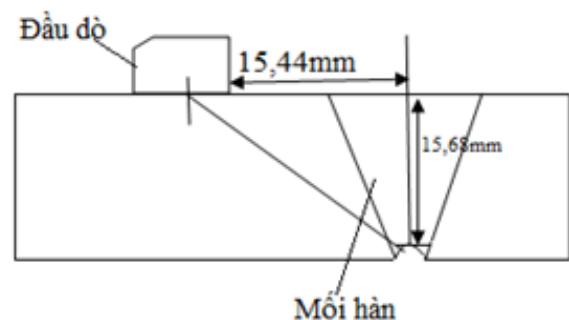
Đối với hàn ống: Sau khi quét dọc theo mối hàn của ống, màn hình hiển thị bắt liên tục

trên. Qua hình ảnh trên có thể xác định bắt liên tục nằm cách bề mặt mối hàn 3,61 mm và cách đầu dò một khoảng 26,76 mm. Đầu dò được sử dụng ở đây vẫn là đầu dò góc với góc khúc xạ 60°. Xung hiển thị có 1 đỉnh cao và xung quanh là các xung nhỏ thì khả năng cao đây là khuyết tật dạng xỉ. Tiếp theo biểu diễn sơ đồ hình học để xác định chính xác vị trí và loại khuyết tật.

Từ sơ đồ trên có thể xác định khuyết tật nằm bên trái của mối hàn và là tạp chất dạng xỉ. Biên độ xung phản hồi tại vị trí này vượt trên 20 % so với mức quy chuẩn nên theo tiêu chuẩn ASME thì mối hàn này sẽ bị loại bỏ và hàn lại [5].



Hình 3.7. Màn hình hiển thị tín hiệu cho mối hàn lỗi



Hình 3.8. Biểu diễn hình học sơ đồ truyền âm trong mẫu lỗi

Sau khi quét dọc toàn bộ mối hàn, màn hình hiển thị tín hiệu xung như trên cho thấy

bất liên tục nằm ở độ sâu 15,68 mm so với bề mặt mối hàn và cách đầu dò 15,44 mm. Qua hình ảnh xung và căn cứ mức độ sâu khi phát hiện khuyết tật thì khả năng cao đây là khuyết tật không thấu đáy. Đầu dò được sử dụng vẫn là đầu dò góc với góc khúc xạ là 60° . Từ các thông tin trên, tiến hành vẽ sơ đồ biểu diễn hình học đường truyền của sóng âm.

Qua sơ đồ biểu diễn hình học có thể thấy nằm ở giữa mối hàn. Đây là khuyết tật hàn không thấu đáy. Biên độ xung phản hồi tại vị trí này vượt trên 20 % so với mức quy chuẩn nên theo tiêu chuẩn ASME thì mối hàn này sẽ bị loại bỏ và hàn lại [2], [5].

4. KẾT LUẬN

Từ cơ sở lý thuyết và kết quả thực nghiệm thu được cho thấy nguyên lý cơ bản của phương pháp siêu âm và ứng dụng phương pháp này để phát hiện khuyết tật trong mối hàn và các kết cấu kim loại.

Ưu điểm của phương pháp kiểm tra siêu âm là nhanh, chính xác, thiết bị nhỏ gọn, dễ vận chuyển đi lại, phù hợp với điều kiện ngoài công

trường. So với các phương pháp kiểm tra không phá hủy, phương pháp này không yêu cầu nhiều về lắp đặt, thiết kế mẫu như phương pháp chụp ảnh bức xạ. Trong tương lai, với xu hướng các phương pháp tiên tiến ngày càng được sử dụng và phát triển rộng rãi, và áp dụng được nhiều hơn trong đời sống. ♦

Ngày nhận bài: **15/7/2025**

Ngày phản biện: **31/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. PGS, TS. Phùng Văn Duân, “*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2012.
- [2]. Castelló i Esquerdo, Alvar, “*Market analysis for a long range ultrasonic inspection program of the enterprise Areva*”. Universitat Politècnica de València, 2012.
- [3]. TS. Nguyễn Trọng My, KS. Nguyễn Trọng Quốc Khánh, “*Các phương pháp kiểm tra không phá hủy – Kiểm tra siêu âm*”. NXB. Giáo dục Việt Nam, 2015.
- [4]. Jacob Owen Davies, “*Inspection of pipes using low frequency focused guided waves*”, 2008.
- [5]. “*ASME B31.3:2018*”, American Society of Mechanical Engineers, 2018.

ĐỒNG BỘ HÓA ĐỒNG NHẤT CỦA HỆ SIÊU HỖN LOẠN BỐN CHIỀU SỬ DỤNG CÁCH TIẾP CẬN HÀM NĂNG LƯỢNG HAMILTONIAN

IDENTICAL SYNCHRONIZATION OF 4D HYPERCHAOTIC SYSTEMS USING THE HAMILTONIAN ENERGY FUNCTION APPROACH

Nguyễn Như Hiếu^{1,*}, Phạm Ngọc Chung²

¹Khoa Cơ khí - Cơ điện tử, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenika

²Khoa Khoa học cơ bản, Trường Đại học Mở - Địa chất

Email: hieu.nguyennhu@phenikaa-uni.edu.vn*;
phamngocchung@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Đồng bộ hóa của hai hệ động lực là quá trình mà ở đó cả hai hệ điều chỉnh trạng thái sao cho chúng có tương quan chặt chẽ với nhau hoặc trở nên có ứng xử giống nhau theo một cách nào đó. Đối với hệ có chuyển động hỗn loạn thường nhạy cảm với điều kiện đầu và do đó ứng xử rất khác nhau với các điều kiện đầu khác nhau, điều đó làm cho chúng tưởng như là không thể đồng bộ hóa. Sự thực là việc đồng bộ hóa hai hệ hỗn loạn là có thể nhưng việc lựa chọn tham số đồng bộ là một trong những khó khăn chính. Trong nghiên cứu này, các tác giả sử dụng cách tiếp cận dựa trên hàm năng lượng Hamiltonian để khảo sát sự đồng bộ hóa của hai hệ đồng nhất, tức hai hệ có dạng trường vận tốc giống nhau nhưng khác trạng thái. Hệ được lựa chọn là một hệ Lorenz bốn chiều có đặc điểm chuyển động siêu hỗn loạn, một mức hỗn loạn cao hơn so với hệ Lorenz ba chiều đã biết. Các khảo sát số được tiến hành để khẳng định tính hiệu quả của các tín hiệu đồng bộ hóa.

Từ khóa: Hệ siêu hỗn loạn; Đồng bộ hóa; Năng lượng Hamiltonian; Quỹ đạo pha.

ABSTRACT

Synchronization of two dynamical systems is a process by which both systems adjust their states so that they are closely correlated or become similar in some way. Chaotic systems are often sensitive to initial conditions and therefore behave very differently for different initial conditions, which makes them seem impossible to synchronize. In fact, synchronization of two chaotic systems is possible, but the choice of synchronization parameters is one of the main difficulties. In this study, the authors use a Hamiltonian-based approach to investigate the synchronization of two homogeneous systems, i.e. two systems with the same form of velocity field but different states. The chosen system is a four-dimensional Lorenz system characterized by hyperchaotic motion, a higher level of chaos than the known three-dimensional Lorenz system. Numerical investigations are conducted to confirm the effectiveness of the synchronization signals.

Keywords: Hyperchaotic system; Synchronization; Hamiltonian energy; Phase portrait.

1. GIỚI THIỆU

Đồng bộ hóa của các hệ có chuyển động hỗn loạn là một nội dung hấp dẫn các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực động lực học của các hệ phi tuyến và nhiều lĩnh vực khác, có ứng dụng rộng rãi trong kỹ thuật và công nghệ như truyền thông bảo mật, các hệ cảm biến, các hệ cơ sinh học, robotics và điều khiển [1, 2]. Có một số kiểu đồng bộ hóa phổ biến như đồng bộ hóa đồng nhất, đồng bộ hóa trễ thời gian, đồng bộ hóa pha, đồng bộ hóa tổng quát hóa [3]. Đối với đồng bộ hóa đồng nhất, hai hệ đồng bộ hóa có cùng một dạng biểu diễn véc tơ trường được liên kết với nhau thông qua một số hạng phản hồi tuyến tính hoặc phi tuyến. Đồng bộ hóa trễ thời gian là loại đồng bộ mà hai hệ liên kết với nhau đạt được sự đồng bộ hóa với một khoảng trễ thời gian giữa chúng. Nó có thể xuất hiện trong các ứng dụng truyền tín hiệu qua kênh có độ trễ, trong đó bên nhận tín hiệu (hệ đáp ứng) sẽ bị trễ thời gian so với bên phát tín hiệu (hệ dẫn dắt). Đồng bộ hóa pha là dạng đồng bộ hai hệ mà ở đó chỉ có pha được đồng bộ còn biên độ có thể không nhất thiết giống nhau. Trong các hệ hỗn loạn, tín hiệu thường không có tính chất tuần hoàn và do đó đồng bộ hóa pha cần sử dụng các kỹ thuật đặc biệt [4]. Ở dạng tổng quát trong bài toán đồng bộ hóa, người ta có thể đưa vào các tiêu chuẩn đồng bộ mà ở đó quan hệ giữa hệ dẫn dắt và hệ đồng bộ (bị dẫn dắt) có thể có liên kết với nhau thông qua một biểu diễn hàm [5]. Trong nghiên cứu này, các tác giả tập trung vào vấn đề đồng bộ hóa đồng nhất của hai hệ đồng nhất bốn chiều có chuyển động hỗn loạn. Hai hệ này có cùng dạng biểu diễn trường nhưng có liên kết tuyến tính với nhau. Hệ có chuyển động hỗn loạn có đặc trưng số mũ Lyapunov mang dấu dương. Đối với các hệ có nhiều hơn một số mũ Lyapunov dương, tức là tối thiểu hai số mũ Lyapunov dương được gọi với cái tên siêu hỗn loạn [6]. Các hệ siêu

hỗn loạn có số chiều lớn hơn hoặc bằng bốn. Việc đồng bộ hóa các hệ hỗn loạn ba chiều đã được nghiên cứu trong nhiều tài liệu. Tuy nhiên, đối với các hệ siêu hỗn loạn, việc đồng bộ hóa cũng được quan tâm nghiên cứu. Trong nghiên cứu của Peng và đồng nghiệp [7], hai hệ đồng nhất có chuyển động hỗn loạn được đồng bộ hóa sử dụng một kỹ thuật chọn ma trận trong cấu trúc liên kết giữa hai hệ. Các hệ siêu hỗn loạn còn có thể đạt được đồng bộ hóa trong một nghiên cứu thực nghiệm trên mạch điện được thực hiện bởi Tamasevicius và đồng nghiệp [8]. Tiềm năng của hệ nhiều chiều nói chung và hệ bốn chiều nói riêng, có tính chất chuyển động hỗn loạn là rất lớn trong các ứng dụng kỹ thuật [1, 2, 4]. Một điểm khó khăn trong đồng bộ hóa hệ lớn hơn 3 chiều nằm ở số chiều lớn, dẫn đến tính chất hỗn loạn mạnh hơn so với hệ ba chiều. Điều đó dẫn đến lựa chọn miền hợp lý của tham số liên kết đảm bảo sự đồng bộ hóa là tương đối khó. Trong nghiên cứu này, các tác giả đề xuất xây dựng một phương pháp đồng bộ hóa đồng nhất dựa trên khái niệm năng lượng Hamiltonian cho một hệ siêu hỗn loạn bốn chiều. Đây là cách tiếp cận cho phép tìm miền tham số của hệ số liên kết để hai hệ đồng bộ hóa một cách hiệu quả.

2. THIẾT LẬP ĐỒNG BỘ HÓA ĐỒNG NHẤT CỦA HỆ NHIỀU CHIỀU

Ta xét hệ ô-tô-nôm nhiều chiều tổng quát hóa có dạng sau:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) \quad (1)$$

Trong đó, $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in \mathbf{R}^n$ là véc tơ trạng thái phụ thuộc thời gian t , $\mathbf{f}: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ là một hàm trơn, phi tuyến n chiều và chỉ phụ thuộc vào véc tơ trạng thái $\mathbf{X}$. Véc tơ $\mathbf{f}$ có ý nghĩa như một trường vận tốc của hệ. Người ta đã chỉ ra rằng, với hệ ô-tô-nôm (1), tồn tại một hàm vô hướng $H = H(\mathbf{X})$ phụ thuộc biến trạng 

thái, gọi là hàm năng lượng Hamiltonian sao cho:

$$\dot{H} = \nabla H^T(\mathbf{X})\mathbf{f}_d(\mathbf{X}) \quad (2.1)$$

$$\nabla H^T(\mathbf{X})\mathbf{f}_c(\mathbf{X}) = 0 \quad (2.2)$$

Trong đó, theo định lý Hemholtz [9], trường véc tơ $\mathbf{f}$ có thể được tách thành hai trường véc tơ $\mathbf{f}_c$ và $\mathbf{f}_d$ với $\mathbf{f}_c = \mathbf{f}_c(\mathbf{X})$ được gọi là trường tự do đối với độ phân kỳ (divergence), tức là không đóng góp vào độ phân kỳ của hệ, còn $\mathbf{f}_d = \mathbf{f}_d(\mathbf{X})$ là trường gradient mang theo toàn bộ độ phân kỳ của hệ. Hệ (1) được gọi là hệ dẫn dắt, là một hệ độc lập, và đầu ra của nó có tác động đến một hệ khác được gọi là hệ đồng bộ hóa, hay hệ bị dẫn dắt. Nếu hai hệ này có dạng trường véc tơ giống nhau, ta gọi là đồng bộ hóa đồng nhất. Giả sử hệ đồng bộ hóa đồng nhất của hệ dẫn dắt (1) có dạng sau đây:

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{f}(\mathbf{Y}) + \mathbf{K}(\mathbf{X} - \mathbf{Y}) \quad (3)$$

Trong đó, ma trận $\mathbf{K}$ được gọi là ma trận liên kết, còn gọi là ma trận phản hồi, chứa các tham số hằng số. Trong nhiều tình huống ma trận $\mathbf{K}$ có thể được lấy là một ma trận đường chéo mà các phần tử của nó là bằng nhau và bằng γ . Gọi $P(\gamma)$ là hàm chi phí năng lượng trung bình để duy trì mức độ đồng bộ hóa của hệ động lực. Mức độ đồng bộ hóa đạt được nếu chuẩn sai số $\|\mathbf{X} - \mathbf{Y}\|$ tiến dần về 0 khi thời gian t đủ lớn. Hàm $P(\gamma)$ được xác định như sau [9]:

$$P(\gamma) = -\langle \nabla H^T(\mathbf{X})\mathbf{f}_d(\mathbf{X}) \rangle \quad (4)$$

Trong đó, $\langle \cdot \rangle$ ký hiệu trung bình theo thời gian của hàm. Trong phần sau, ta sẽ sử dụng cách tiếp cận dựa trên hàm năng lượng Hamiltonian ở trên để đồng bộ hóa một hệ bốn chiều, gọi là hệ Lorenz bốn chiều.

3. ĐỒNG BỘ HÓA HỆ LORENZ BỐN CHIỀU DỰA TRÊN HÀM NĂNG LƯỢNG HAMILTONIAN

Xét hệ Lorenz bốn chiều [10], sau đây được chọn là hệ dẫn dắt với biến trạng thái $\mathbf{X} = [x \ y \ z \ w]^T$:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= bx - cy - xz + w \\ \dot{z} &= -dz + xy \\ \dot{w} &= -ky - rw \end{aligned} \quad (5)$$

và hệ đồng bộ hóa hay hệ bị dẫn dắt với biến trạng thái $\mathbf{Y} = [x_r \ y_r \ z_r \ w_r]^T$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= a(y_r - x_r) + \gamma(x - x_r) \\ \dot{y}_r &= bx_r - cy_r - x_r z_r + w_r + \gamma(y - y_r) \\ \dot{z}_r &= -dz_r + x_r y_r + \gamma(z - z_r) \\ \dot{w}_r &= -ky_r - rw_r + \gamma(w - w_r) \end{aligned} \quad (6)$$

Từ biểu diễn của trường véc tơ, ta có thể chọn các phần tử lấy toàn bộ độ phân kỳ của hệ để thiết lập hàm $\mathbf{f}_d$, tức là ta sẽ chọn ra các số hạng làm cho phân kỳ khác 0 trong từng thành phần của trường. Cụ thể, các thành phần sau được chọn: $[-ax, -cy, -dz, -rw]^T$ có độ phân kỳ tương ứng là tổng của các đạo hàm riêng của từng thành phần của trường theo các biến x, y, z, w tương ứng:

$$\text{div}(\mathbf{f}) = \partial f_1 / \partial x + \partial f_2 / \partial y + \partial f_3 / \partial z + \partial f_4 / \partial w = -a - c - d - r;$$

các phần tử còn lại của trường sẽ thiết lập hàm $\mathbf{f}_c$ là tự do đối với độ phân kỳ:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_c &= [ay \quad bx - xz + w \quad xy \quad -ky]^T \\ \mathbf{f}_d &= [-ax \quad -cy \quad -dz \quad -rw]^T \end{aligned} \quad (7)$$

Phương trình để xác định hàm Hamiltonian H được tìm dựa vào phương trình (2.2):

$$ay \frac{\partial H}{\partial x} + (bx - xz + w) \frac{\partial H}{\partial y} + xy \frac{\partial H}{\partial z} + (-ky) \frac{\partial H}{\partial w} = 0 \quad (8)$$

Nghiệm H thu được từ (8) có dạng sau đây:

$$H = \frac{1}{2} \left(-\frac{b}{a} x^2 + y^2 + z^2 + \frac{1}{k} w^2 \right) \quad (9)$$

Đạo hàm của hàm năng lượng H dọc theo quỹ đạo của hệ dẫn dất được tìm là:

$$\dot{H} = bx^2 - cy^2 - dz^2 - \frac{r}{k} w^2 \quad (10)$$

Hàm năng lượng H_r của hệ đồng bộ hóa thu được bằng cách thay véc tơ $X = [x \ y \ z \ w]^T$ bởi véc tơ $Y = [x_r \ y_r \ z_r \ w_r]^T$, tức là:

$$H_r = \frac{1}{2} \left(-\frac{b}{a} x_r^2 + y_r^2 + z_r^2 + \frac{1}{k} w_r^2 \right) \quad (11)$$

Sự đồng bộ hóa của hai hệ phản ánh rằng hàm năng lượng H của chúng phải tiệm cận đến nhau và do đó sẽ không còn phụ thuộc vào tham số liên kết γ :

$$\lim_{\gamma \rightarrow \infty} (H_r - H) = 0 \quad (12)$$

Năng lượng cần thiết, tức mức hao phí năng lượng cần thiết để duy trì sự đồng bộ hóa là:

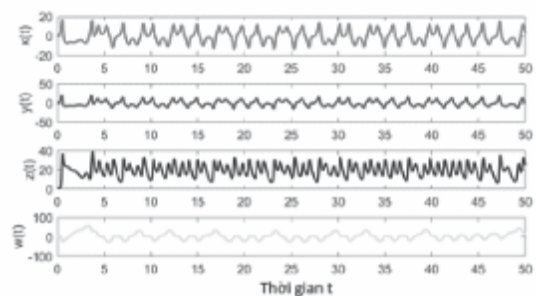
$$P(\gamma) = -\langle \nabla H^T(\mathbf{X}) \mathbf{f}_d(\mathbf{X}) \rangle = bx^2 - cy^2 - dz^2 - \frac{r}{k} w^2 \quad (13)$$

Kết quả đồng bộ hóa dựa trên hàm năng lượng và mức hao phí năng lượng để duy trì sự đồng bộ hóa được minh họa bằng mô phỏng số trong phần dưới đây.

4. KẾT QUẢ SỐ VÀ THẢO LUẬN

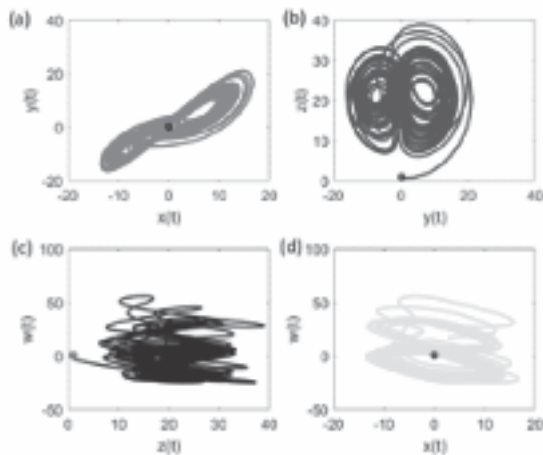
4.1. Chuyển động siêu hỗn loạn của hệ Lorenz bốn chiều

Hệ Lorenz bốn chiều (5) được giải bằng thuật toán số Runge-Kutta bậc bốn, với các tham số $a = 12$, $b = 23$, $c = 1$, $d = 2.1$, $k = 6$, $r = 0.2$. Điều kiện đầu được chọn là $X_0 = [0 \ 0.2 \ 1 \ 1]^T$. Thời gian mô phỏng được lấy là 1000 (đvt: gọi là đơn vị thời gian cho tổng quát), bước thời gian là $\Delta t = 0.01$. Trên Hình 1 hiển thị tiến triển theo thời gian của các nghiệm x , y , z , w của hệ dẫn dất. Với các tham số được chọn ở trên, hệ được chỉ ra là có tính chất chuyển động siêu hỗn loạn (hyperchaos) bởi vì hệ có hai số mũ Lyapunov dương, một số mũ bằng không và một số mũ âm [10]. Dạng điệu theo thời gian của mỗi đáp ứng không có bất kỳ sự lặp lại nào mà là sự phong phú của các dao động mà ở đó chúng vẫn luôn bị chặn trong một miền dao động nào đó. Để minh họa rõ hơn về sự phong phú của dao động mang tính chất hỗn loạn, biểu diễn trên các mặt phẳng pha x - y , y - z , z - w , x - w của ứng xử hệ được trình bày trên Hình 2.



Hình 1. Tiến triển theo thời gian của đáp ứng x , y , z , w trong hệ Lorenz bốn chiều



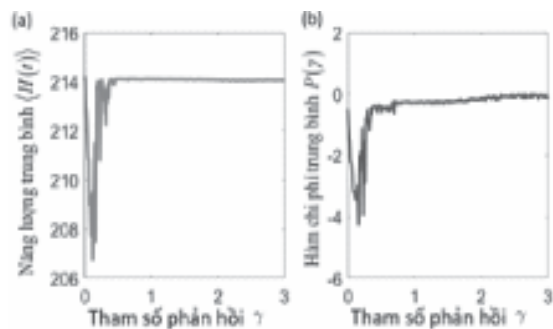


Hình 2. Quỹ đạo pha với chuyển động hỗn loạn của hệ Lorenz bốn chiều trong các mặt phẳng $x-y$, $y-z$, $z-w$, $x-w$.

Tính chất siêu hỗn loạn của hệ chỉ ra đặc điểm khó đoán định về ứng xử của hệ với các điều kiện đầu vào khác nhau, tức nó thuộc loại nhạy cảm với điều kiện đầu hơn cả đối với hệ hỗn loạn thông thường với chỉ một số mũ Lyapunov dương. Tính chất siêu hỗn loạn dẫn tới việc đồng bộ hóa của hệ là một thách thức hơn so với hệ hỗn loạn thông thường. Tuy nhiên, với cách tiếp cận hàm năng lượng Hamiltonian, ta có thể nhận dạng sự đồng bộ hóa trong miền xác định của tham số liên kết γ .

4.2. Sự đồng bộ hóa

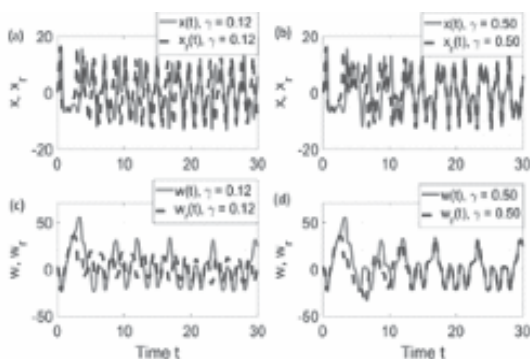
Hệ (6) được đồng bộ hóa với hệ dẫn dắt (5) thông qua sự đóng góp của tham số liên kết γ . Tham số này có ý nghĩa là một tham số phản hồi từ tín hiệu nhận được của hệ dẫn dắt và truyền dẫn cho hệ bị dẫn dắt (6). Tùy vào việc lựa chọn tham số γ mà tính chất đồng bộ hóa có được thực hiện hay không. Điều kiện đầu của hệ bị dẫn dắt (6) được lấy là $Y_0 = [0.5 \ 0.4 \ 2 \ 2]^T$. Điều kiện này có sự thay đổi so với điều kiện đầu của hệ dẫn dắt.



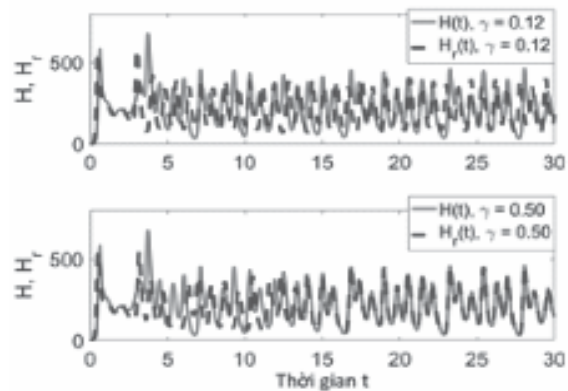
Hình 3. (a) Đồ thị năng lượng trung bình $\langle H(t) \rangle$ và (b) hàm chi phí trung bình theo sự thay đổi của tham số phản hồi γ

Với sự đồng bộ hóa nếu diễn ra thì ứng xử của hai hệ (5) và (6) sẽ tiệm cận nhau khi thời gian t đủ lớn. Hình 3 chỉ ra sự thay đổi của năng lượng trung bình của hệ bị dẫn dắt và sự mức hao phí năng lượng cho sự đồng bộ hóa phụ thuộc vào tham số liên kết γ . Miền tham số liên kết được lấy là $[0, 3]$. Rõ ràng từ Hình 3a, bắt đầu từ khoảng giá trị $\gamma = 0.4$ trở đi, năng lượng trung bình theo thời gian $\langle H(t) \rangle$ tiệm cận tới giá trị hằng số. Điều này phản ánh thực tế rằng, quá trình đồng bộ đạt hiệu quả và đồng bộ hoàn toàn khi năng lượng trung bình của chuyển động hỗn loạn đạt trạng thái không đổi và năng lượng này của cả hai hệ đồng bộ và hệ dẫn dắt là gần như nhau. Trước khi đạt được sự đồng bộ, năng lượng trung bình $\langle H(t) \rangle$ là nhạy cảm với sự thay đổi của tham số liên kết γ . Giá trị năng lượng đồng bộ rơi khoảng 214 (đơn vị năng lượng) và gần như không đổi trên miền khảo sát của γ . Mặc dù sự đồng bộ hóa diễn ra nhưng sự thực là hệ cần một năng lượng nhất định để duy trì sự đồng bộ hóa đó. Hình 3b phản ánh rằng hàm hao phí năng lượng P sẽ tiệm cận về không khi giá trị của tham số liên kết γ đủ lớn. Để hiểu rõ hơn về việc lựa chọn tham số γ ảnh hưởng như thế nào đến sự đồng bộ hóa, ta chọn hai trường hợp là $\gamma = 0.12$ và $\gamma = 0.5$. Giá trị $\gamma = 0.12$ nằm trong miền mà năng lượng trung bình $\langle H(t) \rangle$ tương đối nhạy cảm, và do đó sự đồng bộ hóa là không diễn ra

cho dù ta mô phỏng hệ với thời gian tương đối lớn. Hình 4a và 4c minh họa rằng với $\gamma = 0.12$, các cặp đáp ứng x, x_r và w, w_r của hệ dẫn dất và bị dẫn dất là không thể đồng bộ; giá trị các đáp ứng là khác xa nhau với các điều kiện đầu khác nhau. Tuy nhiên, trên các Hình 4b và 4c ứng với $\gamma = 0.5$ thì sau một khoảng thời gian đủ lớn, chẳng hạn bắt đầu từ 16 (đvt), thì hai hệ bắt đầu đồng bộ. Trước khoảng thời gian này, hai hệ được lấy hai điều kiện đầu khác nhau nên có ứng xử tương đối khác nhau, và ứng xử đó sẽ có xu hướng gần nhau khi thời gian tăng lên. Tương tự như vậy, ta cũng có quan sát về sự đồng bộ đối với năng lượng H và tốc độ thay đổi năng lượng dH/dt trên Hình 5. Mặc dù năng lượng H và tốc độ dH/dt cũng có sự thay đổi hỗn loạn theo đáp ứng nhưng chúng bắt đầu trùng khớp lên nhau khi thời gian t đủ lớn, bắt đầu từ khoảng 16 (đvt). Kết quả trên phản ánh rằng năng lượng có thể được xem là một tiêu chuẩn nhận diện sự đồng bộ hóa của hệ thay đổi như thế nào với việc thiết kế lựa chọn các tham số liên kết γ khác nhau.



Hình 4. Tiến triển theo thời gian của $x(t)$ trong hệ dẫn dất và $x_r(t)$ trong hệ đáp ứng trong hai trường hợp tham số $\gamma = 0.12$ và $\gamma = 0.50$ trong quá trình đồng bộ hóa.



Hình 5. Tiến triển theo thời gian của hàm năng lượng $H(t)$ của hệ dẫn dất và hàm năng lượng $H_r(t)$ của hệ đáp ứng trong hai trường hợp $\gamma = 0.12$ và $\gamma = 0.50$ trong quá trình đồng bộ hóa

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, dựa vào cách tiếp cận hàm năng lượng Hamiltonian, các tác giả đã thu được các kết quả chính sau đây:

- Đã chỉ ra các chuyển động siêu hỗn loạn của hệ Lorenz bốn chiều thông qua biểu diễn tiến triển theo thời gian và biểu diễn trong các mặt phẳng pha khác nhau.

- Dựa vào việc lựa chọn các hàm gradient và hàm tự do với sự phân kỳ (tức không đóng góp vào sự phân kỳ), một hàm năng lượng Hamiltonian cho hệ Lorenz bốn chiều đã thu được và coi như là một sự mở rộng của hàm Hamiltonian của hệ Lorenz ba chiều đã biết.

- Tính chất của sự đồng bộ hóa được minh họa thông qua tiêu chuẩn về giá trị trung bình năng lượng theo thời gian. Việc chọn giá trị của tham số liên kết có thể dựa vào đường cong năng lượng trung bình. Sự đồng bộ hóa xảy ra khi có một lựa chọn tham số liên kết hợp lý mà ở đó năng lượng trung bình của hai hệ dẫn dất và hệ bị dẫn dất tiệm cận nhau.



- Hàm chi phí biểu diễn mức năng lượng cần thiết để duy trì sự đồng bộ hóa cũng được khảo sát. Kết quả chỉ ra rằng khi đạt đồng bộ hóa hoàn toàn, năng lượng chi phí này sẽ tiệm cận giá trị không.

- Trong các khảo sát sau, các tính chất của năng lượng trung bình sẽ được nghiên cứu kỹ hơn với các tham số khác nhau của hệ siêu hỗn loạn mà ở đó tính chất siêu hỗn loạn biểu hiện rất khác nhau trong từng miền tham số. ❖

Ngày nhận bài: **16/6/2025**

Ngày phản biện: **04/7/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Arkady Pikovsky, Michael Rosenblum, Jürgen Kurths, “*Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences*”. Cambridge University Press (2001).
- [2]. Alexander Balanov, Natalia Janson, Dmitry Postnov, Olga Sosnovtseva, “*Synchronization: From Simple to Complex*”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2009).
- [3]. S. Boccaletti, J. Kurths, G. Osipov, D.L. Valladares, C.S. Zhou, “*The synchronization of chaotic systems*”. Physics Reports, 366, 1-101 (2002).
- [4]. Michael G. Rosenblum, Arkady S. Pikovsky, and Jürgen Kurths, “*Phase synchronization of chaotic oscillators*”. Physical Review Letters, 76, 1804-1807 (1996).
- [5]. J. Liu, G. Chen, X. Zhao, “*Generalized synchronization and parameters identification of different-dimensional chaotic systems in the complex field*”. Fractals, 29, No. 04, 2150081 (2021).
- [6]. Lijuan Chen, Song Tang, Qingdu Li, Shouming Zhong, “*A new 4D hyperchaotic system with high complexity*”. Mathematics and Computers in Simulation, 146, 44-56 (2018).
- [7]. J. H. Peng, E. J. Ding, M. Ding, “*Synchronizing hyperchaos with a scalar transmitted signal*”. Physical Review Letters, 76, 904-907 (1996).
- [8]. A. Tamasevicius, G. Mykolaitis, A. Cenys, “*Synchronization of 4D hyperchaotic oscillators*”. Electron. Lett. 32, 1536-1537 (1996).
- [9]. C. Sarasola, F. J. Torrealdea, A. d'Anjou, A. Moujahid, and M. Grana, “*Energy balance in feedback synchronization of chaotic systems*”. Physical Review E, 69, 011606 (2004).
- [10]. Yuming Chen, Qigui Yang, “*Dynamics of a hyperchaotic Lorenz-type system*”. Nonlinear Dynamics, 77, 569-581, (2014).

MỘT TIÊU CHUẨN SAI SỐ BẬC CAO TÌM NGHIỆM XẤP XỈ CHO TẦN SỐ DAO ĐỘNG TỰ DO CỦA HỆ PHI TUYẾN CÓ CHỨA ĐẠO HÀM CẤP BA

A HIGHER-ORDER ERROR CRITERION FOR FINDING APPROXIMATE SOLUTIONS OF FREE VIBRATION FREQUENCIES OF NONLINEAR SYSTEMS WITH THE THIRD-ORDER DERIVATIVE

Phạm Ngọc Chung^{1,*}, Nguyễn Như Hiếu²

¹Khoa Khoa học cơ bản, Trường Đại học Mở - Địa chất

²Khoa Cơ khí - Cơ điện tử, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa

Email: phamngocchung@humg.edu.vn*;

hieus.nguyennhu@phenikaa-uni.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ phi tuyến có chứa đạo hàm cấp cao thường tạo ra các động lực học phức tạp. Đối với hệ có chứa đạo hàm cấp ba, ứng xử của hệ sẽ liên quan đến sự thay đổi của gia tốc, hay còn gọi là gia tốc biến thiên (jerk), và dẫn đến trạng thái chuyển động mà ở đó người ta có thể cảm nhận được mức độ “êm ái” của chuyển động. Trong nghiên cứu này, các tác giả đề xuất sử dụng một tiêu chuẩn sai số bậc cao, cụ thể là tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình để tìm nghiệm xấp xỉ cho tần số dao động tự do của một hệ phi tuyến có chứa đạo hàm cấp ba. Tiêu chuẩn có thể coi như một dạng bậc cao so với tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình đã biết. Hệ được xét có thành phần phi tuyến là tích của chuyển vị, vận tốc và gia tốc. Kết quả thu được chỉ ra rằng tiêu chuẩn đề xuất cho sai số tương đối nhỏ và nhỏ hơn so với các kết quả tần số thu được từ một số công bố trước đây. Tiêu chuẩn này có thể áp dụng cho các hệ phi tuyến khác nhau.

Từ khóa: Hệ phi tuyến; Đạo hàm cấp ba; Tiêu chuẩn sai số; Tần số xấp xỉ.

ABSTRACT

Nonlinear systems containing higher-order derivatives often produce complex dynamics. In dynamical systems with the third-order derivative, their behaviors will involve the acceleration variation, also known as jerk, and lead to a state of motion where one can feel the “smoothness” of the motion. In this study, the authors propose the use of a higher-order error criterion, namely the mean quartic error criterion, to find an approximate solution for the free vibration's frequency of a nonlinear system containing the third-order derivative. The proposed criterion can be considered as a higher-order form of the well-known mean squared error criterion. The system under consideration has a nonlinear component that is the product of displacement, velocity, and acceleration. The obtained results show that our approach gives relatively small errors and is smaller than the frequency results received from some previous publications. The used criterion can be applied to various nonlinear systems.

Keywords: Nonlinear system; Jerk; Error criterion; Approximate frequency.



1. GIỚI THIỆU

Đạo hàm cấp cao xuất hiện trong một hệ phi tuyến thường dẫn đến các đặc trưng phong phú về động lực học [1]. Đây là chủ đề được quan tâm nghiên cứu trong nhiều thập kỷ trở lại đây, trong đó có vấn đề hệ động lực chứa đạo hàm cấp ba [2]. Đạo hàm cấp ba là đạo hàm theo thời gian của thành phần gia tốc trong hệ động lực, tức liên quan đến tốc độ thay đổi của gia tốc, một đặc trưng mới so với các hệ động lực thông thường có chứa đạo hàm cấp hai. Theo các phát biểu thông thường, đạo hàm cấp một theo thời gian của chuyển dịch được gọi là vận tốc, đạo hàm cấp hai của chuyển dịch gọi là gia tốc; tuy nhiên đạo hàm cấp ba ít được biết đến hơn, sau đây ta gọi đạo hàm cấp ba của chuyển dịch là thành phần giật (jerk trong tiếng Anh). Yếu tố giật xuất hiện trong nhiều bài toán kỹ thuật và vật lý khác nhau [3, 4]. Phương trình chứa giật có thể dẫn đến các hiện tượng chuyển động khác nhau, có thể là chuyển động tuần hoàn [5], có thể là chuyển động hỗn độn [6], tùy thuộc vào các miền tham số khác nhau xuất hiện trong phương trình. Các mô tả chi tiết về giật mà ở đó chuyển động của hệ là hỗn độn, có thể kể đến như von Baeyer [7], Sprott và Linz [8]. Trong khuôn khổ của nghiên cứu này, ta quan tâm đến các chuyển động tuần hoàn có thể xuất hiện trong hệ có thành phần giật. Với các chuyển động tuần hoàn, việc tìm nghiệm giải tích là bài toán có ý nghĩa. Với hệ có giật, nhiều phương pháp đã được đề xuất để tìm nghiệm xấp xỉ của hệ trong một khuôn khổ nào đó mà độ chính xác của nghiệm là chấp nhận được. Cách tiếp cận cân bằng điều hòa cho hệ phi tuyến có chứa giật là một trong những ý tưởng đơn giản và tương đối dễ thực hiện, có thể tìm thấy trong nghiên cứu của Gottlieb [9]. Một cải tiến của phương pháp cân bằng điều hòa để tăng độ chính xác cho nghiệm là phương pháp cân bằng điều hòa dạng

đur, trình bày bởi Leung và Guo [10]. Nghiên cứu về nghiệm xấp xỉ của phương trình chứa giật được báo cáo bởi Karahan [11] sử dụng phương pháp nhiều dạng đa thang (multiple scale), trong đó thành phần phi tuyến được xét trong các tình huống khác nhau (chẳng hạn: tích của chuyển vị, vận tốc và gia tốc; tích của vận tốc và bình phương gia tốc). Gần đây, El-Dib [12] đã phát triển một phương pháp, gọi là tuyến tính hóa tương đương để tìm nghiệm xấp xỉ của phương trình vi phân phi tuyến bậc ba có chứa giật. Phương pháp của El-Dib tỏ ra hiệu quả với miền rộng các tham số và không cần xét đến nhiễu của nghiệm như các phương pháp nhiễu khác. Một phương pháp khác để tìm nghiệm xấp xỉ của hệ phi tuyến có chứa giật dựa vào một tiêu chuẩn sai số cụ thể nào đó. Cách tiếp cận này gần giống với phương pháp tuyến tính hóa tương đương; hệ được giả sử là có một nghiệm xấp xỉ nào đó với biểu diễn nghiệm chứa các tham số cần tìm, như trong nghiên cứu gần đây của Ismail và Abu-Zinadah [13]. Tuy nhiên, khi khảo sát với miền tham số lớn, nghiệm thu được của Ismail và Abu-Zinadah được xem là có sai số tăng dần. Trong nghiên cứu này, các tác giả mở rộng cách tiếp cận của Ismail và Abu-Zinadah, trong đó đề xuất sử dụng tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình, một tiêu chuẩn sai số bậc cao hơn so với sai số bậc hai đã biết. Do đó, nghiệm xấp xỉ tìm được đã được cải tiến về độ chính xác so với tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình trong cách tiếp cận của Ismail. Các khảo sát số được tiến hành nhằm minh họa cho tính hiệu quả của cách tiếp cận đề xuất.

2. TIÊU CHUẨN SAI SỐ BÌNH PHƯƠNG TRUNG BÌNH VÀ MŨ BỐN TRUNG BÌNH

Xét phương trình dạng tổng quát sau đây có chứa đạo hàm cấp ba [5]:

$$\ddot{x} + f(x, \dot{x}, \ddot{x}) = 0 \quad (1)$$

Trong đó, $x = x(t)$ là đáp ứng chuyển dịch, $\dot{x}$ là đáp ứng vận tốc, $\ddot{x}$ là đáp ứng gia tốc, $f(x, \dot{x}, \ddot{x})$ là một hàm phi tuyến của ba đối số chuyển dịch, vận tốc và gia tốc. Nghiệm xấp xỉ của phương trình (1) được giả sử có dạng $x = x_1(t, \omega, P)$ là tuần hoàn với tần số ω , P là tập các tham số có trong biểu diễn nghiệm. Nếu x_1 có biểu diễn tuần hoàn theo dạng chuỗi Fourier thì P ký hiệu tập các tham số của chuỗi xấp xỉ. Thay nghiệm này vào (1), ta thu được sai số $e(t) = \ddot{x}_1 + f(x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1)$. Tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình và mũ bốn trung bình cho phương trình (1) có dạng sau đây:

$$E_{2n}(\omega, P) = \int_0^T e^{2n}(t) dt \rightarrow \min_{\omega, P} \quad (2)$$

Trong đó, $n = 1$ cho tiêu chuẩn bình phương trung bình và $n = 2$ cho tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình; T là chu kỳ dao động của hệ, $T = 2\pi/\omega$. Tiêu chuẩn (2) dẫn tới phương trình sau đây để xác định tần số ω và các tham số của nghiệm xấp xỉ:

$$\frac{\partial E_{2n}(\omega, P)}{\partial \omega} = 0, \frac{\partial E_{2n}(\omega, P)}{\partial P} = 0 \quad (3)$$

Trong phần tiếp theo, để minh họa tiêu chuẩn đề xuất (3) cho phương trình phi tuyến jerk, ta thực hiện tìm tần số cho một hệ phi tuyến mà ở đó thành phần phi tuyến là tích của chuyển dịch, vận tốc và gia tốc.

3. HỆ PHI TUYẾN JERK VỚI THÀNH PHẦN PHI TUYẾN LÀ TÍCH CỦA CHUYỂN DỊCH, VẬN TỐC VÀ GIA TỐC

Trong phần này, ta xét hệ phương trình vi phân phi tuyến sau đây [13]:

$$\ddot{x} + \dot{x} - \gamma x \ddot{x} = 0 \quad (4)$$

Trong đó, γ là một tham số phi tuyến gắn với thành phần là tích của chuyển dịch, vận tốc và gia tốc. Điều kiện đầu của phương trình (4) giả sử là:

$$x(0) = 0, \dot{x}(0) = A, \ddot{x}(0) = 0 \quad (5)$$

Trong đó, chuyển dịch và gia tốc ban đầu tại thời điểm $t = 0$ được giả sử bằng không, trong khi đó vận tốc ban đầu được giả sử khác không và có giá trị A cho trước. Giả sử nghiệm xấp xỉ bậc nhất của (4) có dạng sau đây thỏa mãn điều kiện đầu (5):

$$x_1(t) = x_1(t, \omega, A) = \frac{A}{\omega} \sin \omega t \quad (6)$$

Thay nghiệm (6) vào (2), ta thu được:

$$E_{2n}(\omega) = \sum_{k=0}^{2n} C_{2n}^k \gamma^k A^{2n+2k} (1-\omega^2)^{2n-k} J_{kn}(\omega) \rightarrow \min_{\omega} \quad (7)$$

Trong đó, $C_{2n}^k = (2n)! / (k!(2n-k)!)$;

$J_{kn}(\omega)$ được xác định như sau:

$$J_{kn}(\omega) = \int_0^T \sin^{2k} \omega t \cos^{2n} \omega t dt \quad (8)$$

Chú ý rằng trong biểu diễn nghiệm bậc nhất (6), chỉ có tham số tần số ω là chưa biết. Trong trường hợp xét xấp xỉ bậc cao hơn thì các tham số chưa biết tương ứng sẽ xuất hiện. Do đó, kết quả của (8) là chỉ cực tiểu hóa theo ω để thu được tần số cần tìm. Trong quá trình tính tích phân cho tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình và tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình, các biểu thức sau cho $J_{kn}(\omega)$ sẽ được sử dụng:

$$J_{01} = \pi / \omega, J_{11} = \pi / (4\omega), J_{21} = \pi / (8\omega) \quad \rightarrow$$

$$\begin{aligned} J_{02} &= 3\pi / (4\omega), \quad J_{12} = \pi / (8\omega), \\ J_{22} &= 3\pi / (64\omega), \quad J_{32} = 3\pi / (128\omega), \\ J_{42} &= 7\pi / (512\omega). \end{aligned}$$

3.1. Tần số thu được từ tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình

Trong trường hợp tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình (tức với $n = 1$), ta thu được biểu thức của E_2 là:

$$E_2 = E_2(\omega) = \frac{\pi A^2}{8\omega} [8 + 4\gamma A^2 + \gamma^2 A^4 - (16 + 4\gamma A^2)\omega^2 + 8\omega^4] \quad (9)$$

Đạo hàm của hàm $E_2(\omega)$ theo ω , ta thu được một phương trình trùng phương, giải ra ta được:

$$\omega = \sqrt{\frac{4 + \gamma A^2 + \sqrt{64 + 32\gamma A^2 + 7\gamma^2 A^4}}{12}} \quad (10)$$

3.2. Tần số thu được từ tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình

Trong trường hợp tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình (tức $n = 2$), biểu thức của E_4 có dạng sau đây:

$$E_4 = E_4(\omega) = \frac{\pi A^4}{\omega} (b_0 + b_1\omega^2 + b_2\omega^4 + b_3\omega^6 + b_4\omega^8) \quad (11)$$

Trong đó, các hệ số b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 cho bởi:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{3}{4} + \frac{1}{2}\gamma A^2 + \frac{9}{32}\gamma^2 A^4 + \frac{3}{32}\gamma^3 A^6 + \frac{7}{512}\gamma^4 A^8, \\ b_1 &= -3 - \frac{3}{2}\gamma A^2 - \frac{9}{16}\gamma^2 A^4 - \frac{3}{32}\gamma^3 A^6 \\ b_2 &= \frac{9}{2} + \frac{3}{2}\gamma A^2 + \frac{9}{32}\gamma^2 A^4, \quad b_3 = -3 - \frac{1}{2}\gamma A^2, \quad b_4 = \frac{3}{4} \end{aligned} \quad (12)$$

Tiêu chuẩn (3) dẫn đến phương trình bậc bốn của bình phương tần số:

$$-b_0 + b_1\omega^2 + 3b_2\omega^4 + 5b_3\omega^6 + 7b_4\omega^8 = 0 \quad (13)$$

Trong đó, các hệ số b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 xác định từ (12). Việc giải một phương trình bậc bốn đầy đủ của ω^2 như phương trình (13) là có thể, tuy nhiên biểu thức giải tích của nó là tương đối phức tạp và không được trình bày ở đây; thay vào đó ta tìm nghiệm của (13) dưới dạng số. Ta viết nghiệm của phương trình (13) dưới dạng:

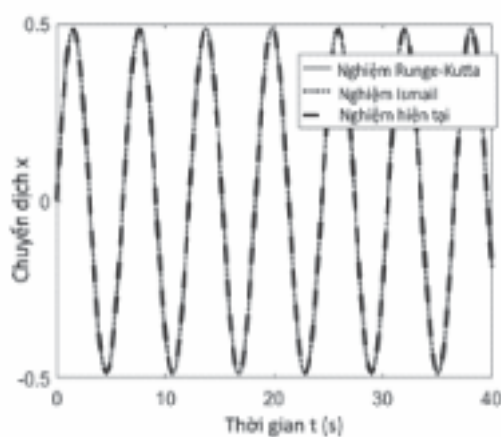
$$\omega = \omega(\gamma, A) \quad (14)$$

Trong đó, chú ý rằng các hệ số b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 phụ thuộc vào tích γA^2 , vì thế ω cũng là hàm của tích γA^2 . Trong phần sau, ta sẽ khảo sát nghiệm của (18) dưới dạng số theo tham số γA^2 .

4. KẾT QUẢ SỐ VÀ THẢO LUẬN

Trong phần này, kết quả số cho phương trình (13) được trình bày. Như nhận định ở trên, ta thấy rằng trong các kết quả nghiệm giải tích (10), (14), tần số là một hàm của tích γA^2 . Tại một giá trị lựa chọn trước của tích γA^2 , ta có thể lựa chọn một tham số γ , vốn là tham số gắn với số hạng phi tuyến của hệ động lực, và lựa chọn một điều kiện ban đầu liên quan đến tham số A . Không giảm tính chất tổng quát, ta có thể giả sử $\gamma = 1$ và khảo sát đáp ứng của hệ thống qua tham số A . Trong Hình 1 là kết quả nghiệm diễn tiến theo thời gian của đáp ứng chuyển vị x với các phương pháp khác nhau gồm: phương pháp số Runge-Kutta bậc 4, nghiệm thu được từ tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình theo cách tiếp cận của Ismail đã thực hiện và nghiệm thu được từ tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình. Giá trị ban đầu A được lấy là $A = 0.5$. Thời gian mô phỏng được lấy là 40 (s). Có thể thấy rằng cả ba phương pháp đều cho kết quả tương đối trùng khớp lên nhau. Kết quả số từ

thuật toán Runge-Kutta là một trong những kết quả tham chiếu tin cậy do nó có độ chính xác cao khi giải quyết các hệ động lực phi tuyến; và do đó nó được lấy làm tham chiếu để đánh giá độ chính xác của các phương pháp giải tích xấp xỉ khác. Nghiệm thu được theo Ismail và nghiệm thu được từ tiêu chuẩn mũ bốn trung bình là tương đối chính xác trong tình huống tham số đã lựa chọn.

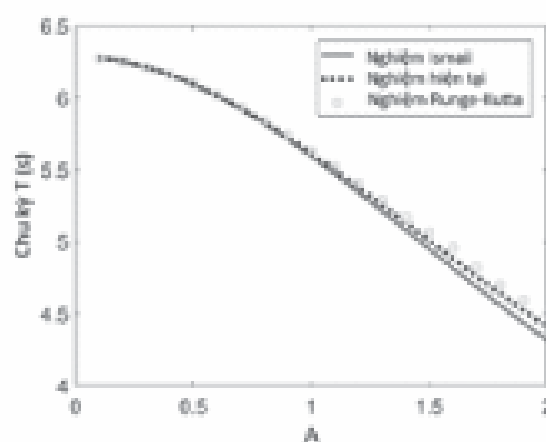


Hình 1. Đồ thị tiến triển theo thời gian của đáp ứng $x_f(t)$ với các phương pháp khác nhau

Để đánh giá hơn nữa về tiêu chuẩn đề xuất, việc khảo sát kết quả tần số dao động xấp xỉ thu được thay đổi theo tham số A là cần thiết. Trước hết, ta có thể thấy rằng tiêu chuẩn (3) cho ta điểm cực tiểu của các hàm số $E_2(\omega)$ và $E_4(\omega)$. Giá trị của đối số ω mà các hàm này cực tiểu chính là tần số cần tìm. Thông qua khảo sát số của hai hàm này theo đối số ω , ta có thể thấy các hàm này đều chỉ có một điểm cực tiểu duy nhất tại một giá trị ω dương. Cụ thể, với $A = 0.5$, ta thu được giá trị tần số tương ứng là $\omega = \omega_{E2} = 1.0312$ theo cách tiếp cận của Ismail, tức tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình; $\omega = \omega_{E2} = 1.0309$ theo cách tiếp cận sai số mũ bốn trung bình; trong khi đó tần số thu được từ phương pháp Runge-Kutta là $\omega = \omega_{RK} = 1.0308$. Đơn vị của tần số vòng ω được lấy là rad/s. Một lần nữa có thể thấy rằng tần số của cả ba cách

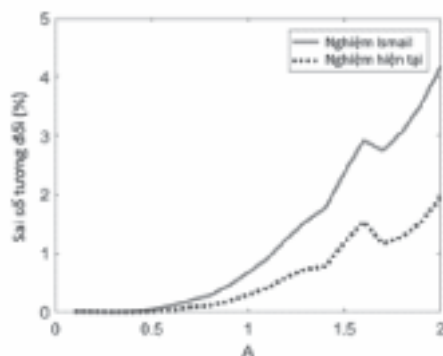
tiếp cận là tương đối gần nhau. Tuy nhiên, sự sai khác giữa cách tiếp cận theo Ismail và tiếp cận theo sai số mũ bốn trung bình bắt đầu bộc lộ khi tăng giá trị của tham số biên độ A .

Trên Hình 2, giá trị số của chu kỳ dao động tương ứng với ba phương pháp đã nêu đều được hiển thị, trong đó đường nét liền màu đỏ thể hiện nghiệm thu được từ Ismail, đường nét đứt màu xanh hiển thị kết quả của tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình. Đáng chú ý sai số tương đối của chu kỳ dao động so với chu kỳ dao động thu được từ thuật toán Runge-Kutta được hiển thị trên Hình 3 với A được lấy từ 0.1 đến 2.0. Ta thấy rằng khi tăng A , nhược điểm của cách tiếp cận Ismail bắt đầu bộc lộ, tức là sai số tương đối tăng dần, ở mức 4% khi $A = 2$, trong khi đó sai số của tiêu chuẩn mũ bốn trung bình thì nhỏ hơn, ở mức 2% khi $A = 2$. Từ khoảng giá trị $A = 0.5$ thì hầu hết tiêu chuẩn mũ bốn bình phương trung bình đều tốt hơn tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình. Điều này cũng tương đối dễ hiểu bởi vì tiêu chuẩn mũ bốn trung bình được lấy là bậc cao của sai số so với tiêu chuẩn bình phương trung bình truyền thống.



Hình 2. Chu kỳ dao động của hệ thay đổi theo tham số A với các phương pháp khác nhau





Hình 3. Sai số tương đối của chu kỳ dao động của nghiệm thu được từ tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình (theo Ismail) và tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình

Bảng 1. So sánh sai số giữa các phương pháp khác nhau theo giá trị của biên độ A

A	Runge-Kutta	Karahan [11]		Leung-Guo [10]		Ismail [13]		Hiện tại	
	T	T	Sai số (%)	T	Sai số (%)	T	Sai số (%)	T	Sai số (%)
0.1	6.2747	6.2753	0.0096	6.2753	0.0096	6.2754	0.0102	6.2753	0.0097
0.2	6.2515	6.2518	0.0049	6.2518	0.0049	6.2519	0.0068	6.2520	0.0077
0.5	6.0956	6.0884	0.1171	6.0885	0.1160	6.0930	0.0427	6.0949	0.0103
1.0	5.6293	5.5258	1.8400	5.5299	1.7659	5.5922	0.6605	5.6129	0.2922
2.0	4.4959	4.6857	4.2210	4.7260	5.1175	4.3157	4.0095	4.4095	1.9234

Bức tranh sai số của phương pháp hiện tại dựa trên tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình còn được làm rõ trên Bảng 1 thông qua so sánh với các kết quả từ các công bố trước đây. Trong bảng này, hai kết quả từ công bố của Karahan [11] và công bố của Leung và Guo [10] được lấy làm minh họa. Rõ ràng rằng, với các giá trị biên độ nhỏ, hầu hết các phương pháp đều cho sai số tương đối là nhỏ, chẳng hạn với $A = 0.1$, sai số của các phương pháp đều ở mức 0.01%. Khi lấy $A = 0.2$ thì sai số tăng lên và có sự phân hóa, tức trong khi sai số của Karahan và Leung-Guo duy trì ở mức 0.05% thì sai số của Ismail

và cách tiếp cận hiện tại có tăng hơn một lượng nhỏ nhất định. Khi tham số A lớn, chẳng hạn $A = 2.0$, sai số thu được từ tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình là nhỏ nhất, ở mức 2%, trong khi các phương pháp còn lại đều ở mức 4-5%. Từ đó có thể khẳng định rằng với biên độ lớn, việc phát triển một tiêu chuẩn sai số bậc cao là cần thiết để làm giảm sai số nghiệm xấp xỉ của hệ phi tuyến.

5. KẾT LUẬN

Việc tìm nghiệm xấp xỉ của một hệ

động lực có chứa thành phần đạo hàm cấp ba được thực hiện trong nghiên cứu này thông qua việc đề xuất sử dụng tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình. Sai số thu được từ giả thiết về dạng nghiệm tuần hoàn bậc nhất của hệ. Kết quả thu được chỉ ra rằng tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình là một tiêu chuẩn có tính hiệu quả, làm giảm sai số tương đối của nghiệm so với sai số tương đối thu được từ tiêu chuẩn sai số bình phương trung bình đã biết. Với giá trị nhỏ của tham số, cụ thể là tham số A đặc trưng cho vận tốc ban đầu, các phương pháp đã biết và phương pháp sai số mũ bốn trung bình cho kết quả gần tương đương nhau về độ chính xác. Tuy nhiên khi A tăng thì sai số giữa các phương pháp đã biết có biểu hiện rõ và tăng dần. Việc sử dụng tiêu chuẩn sai số mũ bốn trung bình làm cho sai số tương đối của nghiệm giảm đi ở mức một nửa, tức xuống còn 2% trong miền tham số khảo sát là một kết quả có thể chấp nhận được. Tần số tìm được càng chính xác thì sai khác pha chuyển động của nghiệm xấp xỉ so với nghiệm đúng (kỳ vọng) của hệ càng được cải thiện, tức giảm thiểu sai số ở mức càng nhỏ thì càng có ý nghĩa về mặt cơ học và vật lý. ❖

Ngày nhận bài: 09/7/2025

Ngày phản biện: 21/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. John H. Hubbard, Beverly H. West, "Differential Equations: A Dynamical Systems Approach: Higher-Dimensional Systems". Springer-Verlag New York, (1995).
- [2]. Stefan J. Linz, "Newtonian jerky dynamics: Some general properties". Am. J. Phys. 66 12 (1998).
- [3]. J. C. Sprott, "Simple chaotic systems and circuits". Am. J. Phys. 68 (2000).
- [4]. Fabien Kenmogne, Samuel Noubissie, Guy Bertrand Ndombou, Eric Tala Tebue, Armel Viquit Sonna, David Yemélé, "Dynamics of two models of driven extended jerk oscillators: Chaotic pulse generations and application in engineering". Chaos, Solitons & Fractals, 152, 111291 (2021).
- [5]. H. P. W. Gottlieb, "Simple nonlinear jerk functions with periodic solutions". Am. J. Phys., 66, No. 10 (1998).
- [6]. Bingxue Li, Bo Sang, Mei Liu, Xiaoyan Hu, Xue Zhang, Ning Wang, "Some jerk systems with hidden chaotic dynamics". International Journal of Bifurcation and Chaos, 33, No. 06, 2350069 (2023).
- [7]. H.C. Von Baeyer, "All shook up". The Sciences 38,12-14 (1998).
- [8]. J.C. Sprott, S.J. Linz, "Algebraically simple chaotic flows". International Journal of Chaos Theory and Applications, 5, 3-22 (2000).
- [9]. H.P.W. Gottlieb, "Harmonic balance approach to periodic solutions of non-linear jerk equations". Journal of Sound and Vibration, 271, 671-683 (2004).
- [10]. A.Y.T. Leungn, Zhongjin Guo, "Residue harmonic balance approach to limit cycles of non-linear jerk equations". International Journal of Non-Linear Mechanics, 46, 898-906 (2011).
- [11]. M.M. Fatih Karahan, "Approximate solutions for the nonlinear third-order ordinary differential equations". Zeitschrift für Naturforschung A, 72, no. 6, pp. 547-557 (2017). <https://doi.org/10.1515/zna-2016-0502>.
- [12]. Yusry O. El-Dib, "The simplest approach to solving the cubic nonlinear jerk oscillator with the non-perturbative method", 45(9), pp. 5165-5183 (2022). <https://doi.org/10.1002/mma.8099>.
- [13]. Gamal M. Ismail, Hana Abu-Zinadah, "Analytic approximations to non-linear third order jerk equations via modified global error minimization method". Journal of King Saud University - Science, 33, 101219 (2021).

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ ĐẾN ĐỘ BỀN VỎ ĐỘNG CƠ PHÓNG TÊN LỬA A87

STUDY ON THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE STRENGTH OF THE LAUNCH ENGINE OF THE A87 ROCKET

ThS. Hà Trung Tự

Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

Email: trungtu40@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo đã trình bày phương pháp nghiên cứu trạng thái ứng suất và biến dạng của vỏ động cơ phóng tên lửa A87 có tính đến ảnh hưởng của nhiệt độ bằng phần mềm Ansys. Kết quả bài báo có thể làm tài liệu tham khảo trong tính toán, thiết kế các sản phẩm động cơ phóng phục vụ an ninh quốc phòng.

Từ khóa: Tên lửa; Động cơ phóng; Thuốc phóng.

ABSTRACT

The paper presents a research method for analyzing the stress and deformation state of the A87 rocket launch engine, taking into account the influence of temperature using Ansys software. The results of the study can serve as a reference for the calculation and design of launch engine products used in national defense and security.

Keywords: Rocket; Launch engine; Propellant.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, các nước phát triển trên thế giới không ngừng nghiên cứu, chế tạo ra các loại tên lửa nhằm trang bị vũ khí cho quân đội và xuất khẩu phục vụ mục đích an ninh quốc phòng. Trong đó, động cơ phóng (ĐCP) là thành phần quan trọng trong tổ hợp tên lửa được ưu tiên quan tâm hàng đầu. Việc thiết kế, chế tạo ĐCP có liên quan đến một loạt lĩnh vực khoa học, kỹ thuật và công nghệ, đặc biệt là lĩnh vực cơ khí, chế tạo máy.

Trong bài báo, tác giả chỉ tập trung

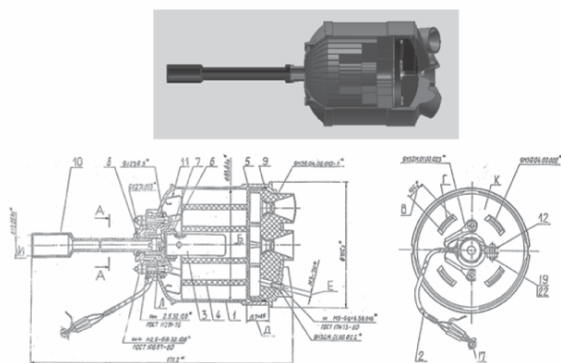
nghiên cứu độ bền của ĐCP thông qua ứng suất và biến dạng của vỏ động cơ bằng phần mềm Ansys có tính đến ảnh hưởng của nhiệt độ, từ đó đề ra các giải pháp hạn chế ảnh hưởng của nhiệt độ đến động cơ phóng, nâng cao tuổi thọ của động cơ.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

Động cơ phóng có ký hiệu 9M39 04.00.000 là động cơ tên lửa nhiên liệu rắn [1, 2, 3, 4, 5] có tác dụng để đẩy quả đạn ra khỏi ống phóng với tốc độ bay và vận tốc góc cần thiết đồng thời môi cháy cho động cơ hành trình

9M39 01. Động cơ phóng có các yêu cầu chiến kỹ thuật cơ bản sau: Vận tốc rời ống phóng nhỏ nhất: 21 m/s; Vận tốc góc: 15 vòng/s; Thời gian làm việc: 0,065s; Áp suất lớn nhất ($T_{bd} = 323^\circ\text{K}$): 175 KG/cm²; Tổng xung lực đẩy: 26 KGs; Nhiệt độ cháy trong buồng đốt: 2370°K; Khối lượng thuốc phóng: 0,124 kg.

Động cơ được cấu tạo từ buồng đốt, trong đó có thuốc phóng nhiên liệu rắn 9X196M, hộp thuốc mồi và cụm nắp động cơ. Ngoài ra, để đảm bảo cho hoạt động, động cơ còn được có các chi tiết như dây dẫn điện, tiếp điểm...



Hình 1. Mô hình động cơ phóng 9M39 04.00.000

Vỏ buồng đốt động cơ (1) là thân bằng thép 30XГCA, một đầu được gia công có dạng hình cầu, trên đỉnh chỏm cầu hàn gắn các mấu cứng và các ống ren để gắn với ống trụ (10) dùng để mồi cháy động cơ hành trình và gắn các dây dẫn (12) cùng tiếp điểm. Đầu phía sau của buồng đốt được gia công để ghép ren với cụm nắp gồm một nắp kim loại 30XГCA có 6 loa phụt. Thuốc phóng 9X196M (4) được cố định trong buồng đốt bằng đĩa chặn thuốc.

2.1. Các giả thiết

Để thuận lợi cho quá trình tính toán mà vẫn đảm bảo được các đặc trưng cơ bản, chúng ta đưa ra một số giả thiết sau [4, 5, 6]:

- Vật liệu biến dạng tuyến tính dưới tác dụng của tải trọng.

- Thời gian làm việc của động cơ ngắn ($t < 0.07\text{s}$) nên coi bài toán là bài toán phân tích tĩnh, tức là vỏ động cơ chịu tác dụng của tải trọng cơ nhiệt tĩnh, có giá trị không đổi.

- Lấy áp suất tác dụng vào thành buồng đốt bằng áp suất lớn nhất của khí thuốc, nhiệt độ thành buồng đốt bằng nhiệt độ lớn nhất xuất hiện trong quá trình làm việc của động cơ phóng.

- Các liên kết cơ học đảm bảo đủ bền.

2.2. Xây dựng mô hình và thứ tự các bước giải bài toán bằng phần mềm ANSYS WORKBENCH

***Bước 1:** Xây dựng mô hình vật thể, đặt thông số vật liệu làm thân động cơ 30XГCA và chia lưới sử dụng phần tử Planet13 với mô hình 2D và phần tử Solid98 với mô hình 3D – 10 nút cơ nhiệt.

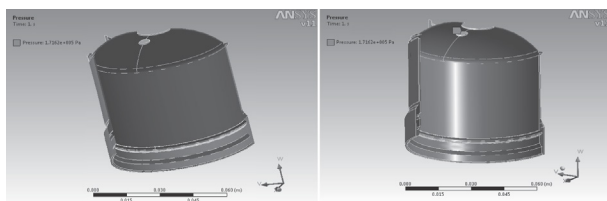
***Bước 2:** Đặt tải (hình 2).

Với hai phương án nhiệt độ môi trường $T_{mt} = 293^\circ\text{K}$ (20°C) và $T_{mt} = 323^\circ\text{K}$ (50°C). Các giá trị đặt tải dưới đây được xác định từ các số liệu thực tế diễn ra quá trình cháy trong động cơ phóng:

***Tải áp suất:** Áp suất khí thuốc $p = p_{\max} = 17162\text{e5 Pa}$ ($\approx 175\text{KG/cm}^2$).

***Tải nhiệt độ:** Nhiệt độ trong buồng đốt: 2370°K; Nhiệt độ thành buồng đốt: 1268°K; Bức xạ nhiệt ra môi trường: Hệ số bức xạ nhiệt: 0.7.





Hình 2. Mô hình đặt tải nhiệt và áp suất trong động cơ phóng A87

*Bước 3: Điều kiện biên

- Về nhiệt độ: Thành trong vỏ ĐC $T = 1268^{\circ}\text{K}$; Thành ngoài vỏ ĐC: $T = T_{\text{mt}} = 293^{\circ}\text{K}$ hoặc 323°K ($T_{\text{mt}} = 20^{\circ}\text{C}$ hoặc $T_{\text{mt}} = 50^{\circ}\text{C}$).

- Về áp suất: Thành trong vỏ ĐC: $p = p_{\text{max}}$; Thành ngoài vỏ ĐC: $p = p_{\text{mt}}$.

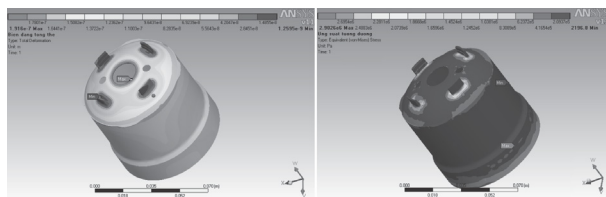
- Về chuyển vị: Hạn chế chuyển vị dọc trục của thân động cơ. Hạn chế chuyển động dọc trục của nắp do vít giữa nắp và khối loa phụt. Ràng buộc giữa thân và nắp bằng ren (bằng hạn chế theo phương x-z).

3. KẾT QUẢ ỨNG SUẤT VÀ BIẾN DẠNG CỦA VỎ ĐỘNG CƠ

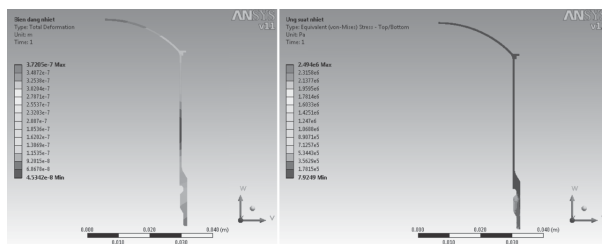
Để thấy rõ ảnh hưởng của các tải trọng nhiệt độ, áp suất, ta tiến hành giải lần lượt các bài toán nhiệt; Bài toán áp suất và Bài toán tổng hợp ứng suất cơ nhiệt. Kết quả ta nhận được trạng thái ứng suất và biến dạng phân bố trong vỏ động cơ phóng ứng với từng trường hợp được thể hiện qua các hình sau:

3.1. Kết quả với nhiệt độ $T_{\text{mt}} = 293^{\circ}\text{K}$ (20°C)

- Biến dạng nhiệt và ứng suất nhiệt:

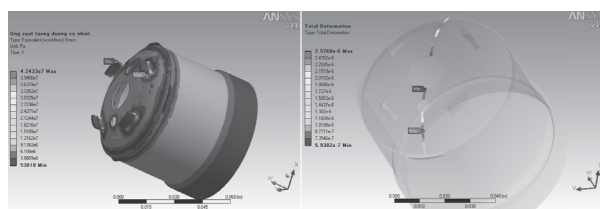


Hình 3. Biến dạng và ứng suất do ảnh hưởng của nhiệt độ trong vỏ động cơ



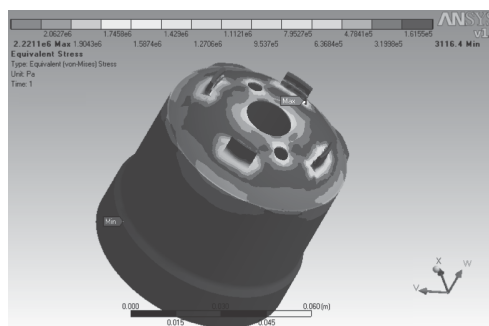
Hình 4. Biến dạng và ứng suất do ảnh hưởng của nhiệt độ dọc theo một đường sinh vỏ động cơ

- Ứng suất và biến dạng cơ nhiệt:

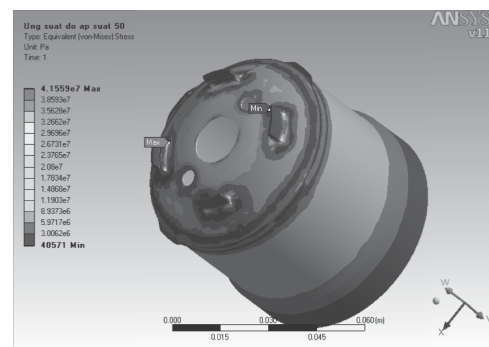


Hình 5. Ứng suất và biến dạng cơ - nhiệt trong vỏ động cơ

3.2. Kết quả với nhiệt độ $T_{\text{mt}} = 323^{\circ}\text{K}$ (50°C)



Hình 6. Ứng suất nhiệt



Hình 7. Ứng suất cơ - nhiệt

Từ kết quả của chương trình, chúng ta thấy:

Ảnh hưởng của nhiệt độ trong động cơ làm thay đổi và tăng giá trị lớn nhất của ứng suất và biến dạng trong vỏ và nắp động cơ. Ứng suất lớn nhất xuất hiện trong vỏ động cơ khoảng $4,24 \cdot 10^7$ Pa và biến dạng lớn nhất là $2,57 \cdot 10^{-6}$ mm (Hình 5). Trong đó, nhiệt độ gây ra ứng suất lớn nhất là khoảng $2,9 \cdot 10^6$ Pa (Hình 3) và biến dạng lớn nhất là $3,72 \cdot 10^{-7}$ mm (Hình 4). Như vậy, nhiệt độ làm tăng 7,44% giá trị ứng suất lớn nhất và 16,82% giá trị biến dạng lớn nhất.

Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường bên ngoài T_{mt} đến trạng thái ứng suất và biến dạng là không đáng kể. Với $T_{mt} = 20^\circ\text{C}$, ứng suất lớn nhất trong vỏ động cơ khoảng $4,24 \cdot 10^7$ Pa (Hình 5), với $T_{mt} = 50^\circ\text{C}$, ứng suất lớn nhất trong vỏ động cơ khoảng $4,16 \cdot 10^7$ Pa (Hình 7). Do đó, có thể bỏ qua ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường T_{mt} đến trạng thái ứng suất và biến dạng.

Ứng suất và biến dạng phân bố không đồng đều theo phương dọc trục cũng như chu vi vỏ động cơ nhưng phân bố đối xứng qua mặt phẳng đối xứng của động cơ. Sự phân bố ứng suất và biến dạng cho thấy phù hợp với kết cấu của động cơ. Do đó, kết quả nhận được là đáng tin cậy.

Ứng suất lớn nhất xuất hiện trong động cơ khoảng $4,24 \cdot 10^7$ Pa và biến dạng lớn nhất là $2,57 \cdot 10^{-6}$ mm (Hình 5). Do đó, với vật liệu là thép 30XГСА thì vỏ động cơ đảm bảo độ bền và độ cứng.

Để hạn chế ảnh hưởng của nhiệt độ, trong vỏ động cơ tên lửa nên phủ sơn cách nhiệt. Tại đáy vỏ động cơ có khoét lỗ gây nên

vùng tập trung ứng suất xung quanh lỗ. Do đó, khi lắp giáp với ống trích khí bằng phương pháp hàn nên có phương án gia cường bề dày xung quanh lỗ này.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng mô hình và tính toán trạng thái ứng suất và biến dạng vỏ ĐCP tên lửa A87 có tính đến ảnh hưởng của nhiệt độ bằng phần mềm Ansys, kết quả của bài báo đã chỉ ra rằng vỏ động cơ phóng bằng vật liệu thép 30XГСА đủ bền; đồng thời ảnh hưởng của nhiệt độ trong động cơ làm thay đổi và tăng giá trị lớn nhất của ứng suất và biến dạng trong vỏ và nắp động cơ. Nhiệt độ làm tăng 7,44% giá trị ứng suất lớn nhất và 16,82% giá trị biến dạng lớn nhất do đó để hạn chế ảnh hưởng của nhiệt độ thì trong vỏ động cơ tên lửa nên phủ sơn cách nhiệt. ♦

Ngày nhận bài: 02/7/2025

Ngày phản biện: 18/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Абугов Д.И., “Теория и расчет расклетных двигателей твердого топлива”. М.: Машиностроение, 1984. - 264с.
- [2]. Алемасов В.Е. Дрегаллин А.Ф., “Теория расклетных двигателей”. М.: Наука. 1986. - 446с.
- [3]. Кузьмин М.П., “Нестационарный Тепловой режим элементов конструкций двигателей летательных аппаратов”. М.: Машиностроение, 1984. - 426с.
- [4]. Bộ môn Đạn, “Nguyên lý kết cấu và tính toán đạn phản lực”, tập I, II. NXB. Học viện Kỹ thuật Quân sự, 1976.
- [5]. Phạm Thế Phiệt, “Lý thuyết động cơ tên lửa”. NXB. Học viện Kỹ thuật Quân sự, 1975.
- [6]. Timôsenko X.P. (1971), “Tám và vỏ”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.

NGHIÊN CỨU VÀ MÔ PHỎNG KIỂM TRA ĐỘ BỀN Ô TÔ TRONG TRƯỜNG HỢP VA CHẠM XIÊN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

RESEARCH AND SIMULATION TESTING OF CAR DURABILITY IN CASE OF
OBLIQUE COLLISION APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD

TS. Nguyễn Minh Thắng

Khoa Cơ khí Động lực, Trường Cơ khí – Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

Email: thangnm@haui.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày một phân tích định lượng về khả năng chống va chạm (crashworthiness) của mẫu xe KIA Pride 2004 trong kịch bản va chạm xiên, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Một mô hình số toàn diện của xe đã được xây dựng trên nền tảng phần mềm Altair HyperWorks, trong đó các đặc tính vật liệu đàn hồi-dẻo của các cấu kiện chính như thép, kính và cao su được định nghĩa chi tiết. Kịch bản va chạm xiên được mô phỏng bằng bộ giải Radioss để đánh giá các thông số động lực học quan trọng, bao gồm trường chuyển vị, phân bố ứng suất Von Mises và sự biến thiên năng lượng. Kết quả chỉ ra rằng biến dạng và ứng suất cực đại tập trung tại các kết cấu phần đầu xe, trong khi ứng suất tổng thể vẫn nằm trong giới hạn bền của vật liệu, đảm bảo tính toàn vẹn của khoang hành khách. Nghiên cứu cung cấp bộ dữ liệu định lượng về hành vi kết cấu của một mẫu xe thế hệ cũ, qua đó đưa ra các khuyến nghị thiết kế nhằm nâng cao hiệu năng an toàn.

Từ khóa: An toàn ô tô; Va chạm xiên; Phương pháp phần tử hữu hạn; Khả năng chống va chạm; KIA Pride 2004.

ABSTRACT

This study presents a quantitative analysis of the crashworthiness of a KIA Pride 2004 model under an oblique collision scenario using the Finite Element Method (FEM). A comprehensive numerical model of the vehicle was developed on the Altair HyperWorks platform, in which the elastic-plastic material properties of key components such as steel, glass, and rubber were defined in detail. The oblique impact scenario was simulated using the Radioss solver to evaluate critical dynamic parameters, including the displacement field, Von Mises stress distribution, and energy variation. The results indicate that maximum deformations and stresses are concentrated in the front-end structures, while the overall stress remains within the material's strength limits, ensuring the integrity of the passenger compartment. The study provides a quantitative dataset on the structural behavior of an older-generation vehicle, thereby offering design recommendations to enhance safety performance.

Keywords: Automotive safety; Oblique impact; Finite element method; Crashworthiness; KIA Pride 2004.

1. GIỚI THIỆU

An toàn phương tiện giao thông là một mục tiêu trọng yếu và không ngừng phát triển trong ngành kỹ thuật ô tô. Theo truyền thống, các thử nghiệm va chạm vật lý là tiêu chuẩn vàng để đánh giá độ bền, nhưng chúng đi kèm với chi phí cao, tốn thời gian và khó lặp lại [1], [2]. Để giải quyết những hạn chế này, các nhà nghiên cứu như Lozia (2022) đã đề xuất các khung khái niệm sử dụng phương pháp mô phỏng số, đặc biệt là phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), như một giải pháp thay thế hiệu quả, cho phép đơn giản hóa quy trình và giảm chi phí trong việc kiểm tra độ bền của các thành phần xe [3].

Các ứng dụng thực tiễn của FEM trong phân tích va chạm ngày càng trở nên tinh vi. Chẳng hạn, Ozcan và Ersoy (2021) đã chứng minh một quy trình phổ biến là chuyển đổi dữ liệu hình học 3D của xe thành các mô hình phần tử hữu hạn để tiến hành mô phỏng trong các phần mềm chuyên dụng như LS-DYNA, cho phép phân tích chi tiết các phản ứng của kết cấu [4]. Tuy nhiên, việc mô hình hóa chính xác các kịch bản va chạm phức tạp không phải không có thách thức. Nghiên cứu của Demiyanyushko và cộng sự (2020) đã chỉ ra những khó khăn trong việc mô tả đúng các hiện tượng như ma sát và biến dạng lớn khi mô phỏng tương tác giữa xe và rào chắn [5]. Trong số các kịch bản phức tạp này, va chạm xiên (oblique collision) là một lĩnh vực được quan tâm đặc biệt. Ví dụ, công trình của Kolesnikova (2021) đã tập trung vào việc xác thực các mô hình đơn giản hóa, như biểu diễn xe như một điểm vật liệu, để phát triển các thuật toán phân tích chuyển động của xe khi va chạm xiên với các rào chắn [6].

Mặc dù các nghiên cứu trên đã cung cấp những hiểu biết sâu sắc về động lực học va chạm và các phương pháp mô phỏng, một

khoảng trống đáng chú ý vẫn tồn tại trong việc phân tích khả năng chống va chạm của các mẫu xe đời cũ, vốn vẫn còn được lưu hành rộng rãi tại các thị trường đang phát triển như Việt Nam. Những phương tiện này, được thiết kế theo các tiêu chuẩn an toàn của thập kỷ trước, có thể không đáp ứng được các yêu cầu bảo vệ hành khách trong các điều kiện va chạm hiện đại. Mẫu xe KIA Pride 2004 là một ví dụ điển hình, đại diện cho một lượng lớn xe du lịch thế hệ cũ đang được sử dụng hằng ngày, nhưng lại thiếu dữ liệu thực nghiệm và mô phỏng về độ bền kết cấu.

Để giải quyết khoảng trống này, nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng và phân tích một mô hình phần tử hữu hạn chi tiết của xe KIA Pride 2004 để mô phỏng kịch bản va chạm xiên. Mục tiêu của bài báo là cung cấp một phân tích định lượng về hành vi kết cấu của xe, bao gồm các thông số về biến dạng, trường ứng suất và khả năng hấp thụ năng lượng. Kết quả của nghiên cứu không chỉ làm phong phú thêm cơ sở dữ liệu về an toàn xe cho các mẫu xe cũ mà còn đưa ra những khuyến nghị thiết thực nhằm cải thiện độ bền và an toàn cho một lượng lớn người dùng phương tiện.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chuẩn bị mô hình xe

Đối tượng nghiên cứu được lựa chọn trong công trình này là mẫu xe Kia Pride 2004.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật chính của xe Kia Pride 2004

Thông số	Chi tiết
Kích thước tổng thể (Dài × Rộng × Cao)	$3.615 \times 1.605 \times 1.460$ mm
Chiều dài cơ sở	2.345 mm
Trọng lượng không tải	~ 780 kg



Mô hình hình học 3D của xe được xây dựng và nhập vào môi trường tiền xử lý Altair HyperMesh dưới định dạng STEP [7-9].



Hình 1. Mô hình hình học 3D của xe KIA Pride 2004.

Các thao tác làm sạch và đơn giản hóa hình học được thực hiện để loại bỏ các chi tiết không ảnh hưởng đến độ cứng kết cấu (ví dụ: các lỗ nhỏ, bo tròn) và sửa lỗi bề mặt nhằm đảm bảo chất lượng cho quá trình chia lưới sau này.

2.2. Rời rạc hóa bằng phần tử hữu hạn

Mô hình hóa phần tử hữu hạn được thực hiện bằng Altair HyperMesh [8], với thân xe

được rời rạc hóa chủ yếu bằng các phần tử vỏ 2D, phù hợp để biểu diễn các kết cấu ô tô dạng thành mỏng. Chất lượng lưới được đánh giá và tinh chỉnh dựa trên các tiêu chí sau:

- Tỷ lệ khung hình: < 5 ;
- Góc xiên: $< 45^\circ$;
- Độ cong vênh: $< 10^\circ$;
- Hệ số Jacobian: > 0.6 .

Các ngưỡng này đảm bảo sự ổn định về mặt số học và độ trung thực về mặt hình học, đặc biệt ở những vùng dự kiến sẽ chịu biến dạng đáng kể, chẳng hạn như cản trước và hốc bánh xe.

2.3. Mô hình hóa vật liệu

Mô phỏng sử dụng ba định nghĩa vật liệu chính tương ứng với các bộ phận ô tô trong thực tế. Mỗi vật liệu được mô hình hóa với hành vi đàn hồi-nhựa dẻo phù hợp, sử dụng các thông số từ sổ tay kỹ thuật và tài liệu đã được kiểm chứng:

Bảng 2. Thuộc tính vật liệu sử dụng trong mô phỏng

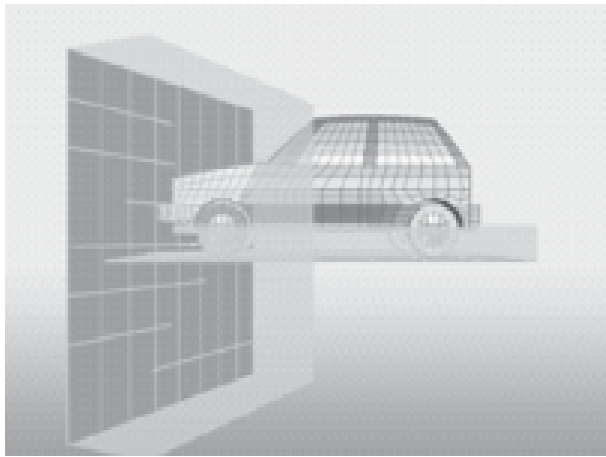
Thuộc tính cơ học	Đơn vị	Thép	Kính	Cao su
		Thân xe & Khung	Kính chắn gió	Lốp xe
Mật độ (ρ)	t/mm ³	7.9×10^{-9}	2.5×10^{-9}	2.0×10^{-9}
Mô-đun Young (E)	MPa	210,000	76,000	200
Hệ số Poisson (ν)	-	0.3	0.3	0.49
Giới hạn chảy (σ_y)	MPa	200	192	1.0×10^{30} *
Hệ số hóa cứng (K)	MPa	450	220	-
Số mũ hóa cứng (n)	-	0.5	0.32	-
Ứng suất bền (σ_b)	MPa	425	-	-

*Giá trị giới hạn chảy rất lớn của cao su được sử dụng để mô hình hóa vật liệu có hành vi gần như hoàn toàn đàn hồi (hyperelastic) trong phạm vi mô phỏng, tức là vật liệu không bị biến dạng dẻo.

Các định nghĩa vật liệu này đã được áp dụng cho các nhóm thành phần phù hợp trong HyperCrash.

2.4. Thiết lập điều kiện biên và tải trọng

Kịch bản va chạm xiên được thiết lập trong HyperCrash [9]. Một bức tường cứng, không biến dạng được mô hình hóa. Mô hình xe được gán vận tốc ban đầu là 15,600 mm/s (tương đương 56 km/h) theo phương hợp với trục dọc của xe một góc 30°.



Hình 2. Mô hình phần tử hữu hạn sau khi thiết lập điều kiện biên và tải trọng va chạm.

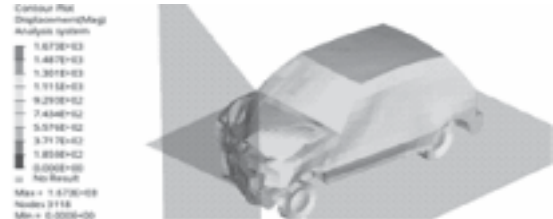
Thiết lập này tuân thủ một phần các khuyến nghị của quy trình thử nghiệm va chạm lệch tâm của Euro NCAP [1, 2]. Tương tác tiếp xúc giữa các bề mặt của xe và giữa xe với tường cứng được định nghĩa bằng thuật toán tiếp xúc bề mặt-bề mặt.

2.5. Cấu hình bộ giải và thiết lập đầu ra

Bài toán được giải bằng bộ giải động lực học tường minh Radioss [7]. Tổng thời gian mô phỏng là 50 ms. Các yêu cầu về dữ liệu đầu ra được thiết lập để ghi lại các thông số cần phân tích như trường chuyển vị, ứng suất, năng lượng và lực phản ứng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích trường chuyển vị



Hình 3. Kết quả mô phỏng trường chuyển vị tổng (mm) tại thời điểm biến dạng cực đại.

Phân tích trường chuyển vị Hình 3 cho thấy biến dạng được tập trung hiệu quả tại vùng đầu xe. Chuyển vị cực đại đạt giá trị 1.673×10^3 mm, ghi nhận tại khu vực bánh trước bên trái (nút 3118) - vị trí chịu tác động trực tiếp của va chạm. Ngược lại, các vùng kết cấu phía sau, đặc biệt là khoang hành khách, có độ chuyển vị rất thấp, cho thấy tính toàn vẹn của không gian an toàn được bảo toàn. Kết quả này khẳng định vai trò của kết cấu đầu xe trong việc hấp thụ và tiêu tán năng lượng, ngăn chặn sự xâm nhập vào các vùng trọng yếu.

3.2. Phân bố ứng suất Von Mises

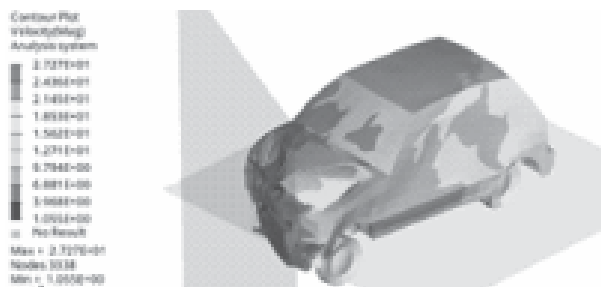
Trường ứng suất Von Mises (Hình 4) cho thấy ứng suất đỉnh đạt 0.8642 MPa, cục bộ tại vùng tiếp xúc va chạm. Giá trị này thấp hơn đáng kể so với giới hạn chảy của vật liệu thép (200 MPa), cho thấy phần lớn kết cấu của xe vẫn hoạt động trong miền đàn hồi.



Hình 4. Kết quả mô phỏng phân bố ứng suất tương đương Von Mises (MPa) trên kết cấu.

Sự tập trung ứng suất cao nhất tại giao diện va chạm và giảm dần về phía sau phản ánh sự phân tán tải trọng hiệu quả. Việc không có vùng ứng suất lớn lan vào khoang hành khách một lần nữa xác nhận khả năng bảo vệ của kết cấu.

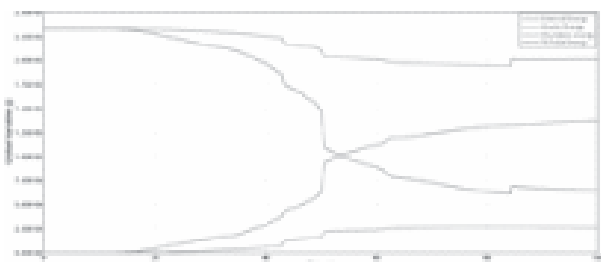
3.3. Phản ứng vận tốc



Hình 5. Kết quả mô phỏng trường vận tốc trên kết cấu xe trong quá trình va chạm.

Hình 5 mô tả phân bố vận tốc trên toàn thân xe trong quá trình va chạm. Có thể quan sát thấy vận tốc lớn nhất đạt khoảng 27.27 m/s tại thời điểm ban đầu, tập trung ở bánh xe và phần đầu xe – nơi tiếp xúc đầu tiên với vật cản. Sau va chạm, vận tốc tại các khu vực này giảm rõ rệt, trong khi phần thân sau vẫn còn giữ vận tốc cao hơn trong một thời gian ngắn, cho thấy quá trình lan truyền và hấp thụ xung lực theo hướng từ trước ra sau. Sự tiêu tán động năng hiệu quả này là một chỉ số quan trọng cho thấy hiệu năng tốt của các vùng hấp thụ xung lực.

3.4. Phân tích khả năng hấp thụ năng lượng



Hình 6. Biểu đồ biến thiên của động năng, nội năng và tổng năng lượng trong quá trình va chạm.

Hình 6 mô tả đặc tính lực phản ứng của tường cứng trong suốt quá trình va chạm. Kết quả cho thấy lực phản ứng đạt cực đại vào khoảng 50 mili-giây, với giá trị xấp xỉ $8.0E+04$ kN, đúng tại thời điểm xe giảm tốc hoàn toàn. Sự chuyển đổi này cho thấy năng lượng va chạm đã được hấp thụ chủ yếu thông qua biến dạng của các cấu kiện. Một lượng nhỏ năng lượng bị mất đi do các cơ chế số học nhưng vẫn trong giới hạn chấp nhận được, xác thực độ tin cậy của mô hình.

3.5. Đặc tính lực phản ứng

Lực phản ứng tại tường cứng đạt giá trị cực đại khoảng 8.0×10^4 kN tại thời điểm 50 ms. Đỉnh lực này tương ứng với thời điểm xe chịu gia tốc âm lớn nhất, phản ánh mức độ tải trọng tối đa mà kết cấu phải chịu đựng. Diễn biến của lực phản ứng theo thời gian cung cấp dữ liệu quan trọng để đánh giá và tối ưu hóa các đường truyền tải trọng trong thiết kế.

3.6. Các vùng biến dạng dẻo

Phân tích biến dạng dẻo cho thấy giá trị lớn nhất đạt 2.408 mm, tập trung cục bộ tại vùng đầu xe. Sự xuất hiện của biến dạng dẻo, dù nhỏ, xác nhận rằng kết cấu đã chịu hư hỏng vĩnh viễn tại vùng hấp thụ xung lực, đúng như mục tiêu thiết kế. Điều này cho thấy cơ chế tiêu tán năng lượng thông qua biến dạng không phục hồi đã hoạt động, tuy nhiên, độ lớn của biến dạng cũng gợi ý tiềm năng cải tiến về vật liệu hoặc hình học để kiểm soát tốt hơn quá trình phá hủy.

3.7. Khuyến nghị

Dựa trên các kết quả phân tích số đã trình bày, một số khuyến nghị thiết kế được đề xuất nhằm cải thiện hiệu năng hấp thụ năng

lượng và nâng cao khả năng bảo vệ hành khách khi va chạm:

- Ứng dụng vật liệu tiên tiến: Khuyến nghị sử dụng thép cường độ siêu cao (UHSS) hoặc vật liệu lai (hybrid) như composite sợi carbon kết hợp với thép tại các khu vực chịu tải trọng lớn, điển hình như cột A và các thanh dầm dọc. Việc này giúp tăng khả năng chịu lực, giảm trọng lượng và hạn chế biến dạng vĩnh viễn trong vùng an toàn.

- Tăng cường mối nối kết cấu: Cần chú trọng thiết kế mối nối và giao diện giữa các cấu kiện để đảm bảo phân bố tải trọng hợp lý, tránh tình trạng tập trung ứng suất – nguyên nhân chính gây hỏng cục bộ. Giải pháp này hỗ trợ lan truyền lực va chạm theo hướng mong muốn và tăng tính toàn vẹn tổng thể của kết cấu.

- Tích hợp hình học hấp thụ năng lượng: Nên áp dụng các cấu trúc hấp thụ năng lượng kiểu lũy tiến, chẳng hạn như kết cấu lượn sóng hoặc vùng hấp thụ xung lực phân đoạn, giúp điều tiết tốc độ biến dạng và kiểm soát tốt hơn phản ứng động học khi va chạm, từ đó bảo vệ người ngồi trên xe hiệu quả hơn [10-11].

Các khuyến nghị nêu trên được củng cố bởi kết quả mô phỏng có độ tin cậy cao, và có thể đóng vai trò như một nền tảng thiết kế cho các dòng xe hiện đại có hiệu năng va chạm vượt trội, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp các hệ thống an toàn chủ động trong tương lai.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xây dựng và phân tích thành công một mô hình phần tử hữu hạn chi tiết của xe KIA Pride 2004 nhằm mô phỏng kịch bản va chạm xiên ở vận tốc 56 km/h. Kết

quả mô phỏng cho thấy biến dạng tập trung chủ yếu tại các cấu kiện phía trước xe, trong khi khoang hành khách vẫn giữ được tính toàn vẹn kết cấu – đáp ứng yêu cầu bảo vệ người ngồi trong xe. Mặc dù ứng suất Von Mises cực đại vẫn dưới giới hạn chảy của thép, sự xuất hiện của biến dạng dẻo tại vùng đầu xe phản ánh tình trạng hư hỏng vĩnh viễn có kiểm soát, đúng với mục tiêu thiết kế vùng hấp thụ xung lực.

Phân tích năng lượng cho thấy quá trình chuyển đổi từ động năng sang nội năng diễn ra hiệu quả, góp phần làm giảm đáng kể vận tốc và lực phản ứng trong thời gian ngắn. Những phát hiện này cung cấp bộ dữ liệu định lượng quan trọng về hành vi kết cấu của một mẫu xe phổ thông thế hệ cũ, vốn còn thiếu trong các tài liệu khoa học hiện hành – đặc biệt tại các thị trường đang phát triển. Đồng thời, nghiên cứu cũng khẳng định độ tin cậy của phương pháp mô phỏng FEM trong việc dự đoán vùng hỏng và đánh giá hiệu năng va chạm, từ đó đề xuất các khuyến nghị thiết kế thực tiễn như sử dụng vật liệu UHSS, tối ưu vùng biến dạng, và tăng cường mối nối.

Tuy vậy, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế. Cụ thể, mô hình hiện chưa tích hợp các yếu tố như mô hình hình nhân hay hệ thống túi khí, nên chưa thể đánh giá trực tiếp rủi ro chấn thương cho hành khách. Trong các nghiên cứu tương lai, việc bổ sung các thành phần này, kết hợp với thử nghiệm thực nghiệm nếu có điều kiện, sẽ giúp nâng cao tính toàn diện và độ xác thực của các kết luận, đồng thời hỗ trợ phát triển các tiêu chuẩn thiết kế an toàn chủ động và bị động cho các dòng xe dân dụng. ❖

Ngày nhận bài: 12/6/2025

Ngày phản biện: 27/6/2025



Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lie, A. and Tingvall, C. (2002), “How Do Euro NCAP Results Correlate with Real-Life Injury Risks? A Paired Comparison Study of Car-to-Car Crashes”. Traffic Injury Prevention, Vol. 3, No. 4. DOI: 10.1080/15389580214632.
- [2]. Kullgren, A., Lie, A. and Tingvall, C. (2010), “Comparison Between Euro NCAP Test Results and Real-World Crash Data”. Traffic Injury Prevention, Vol. 11, No. 6. DOI: 10.1080/15389588.2010.508804.
- [3]. Lozia, Z. (2022), “A Conceptual Framework for Cost Reduction in Vehicle Component Durability Testing Using Simulation”. SAE Technical Paper, 2022-01-0456.
- [4]. Ozcan, R. and Ersoy, H. (2021), “Application of Finite Element Method for Vehicle Crash Test Analysis using LS-DYNA”. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 5.
- [5]. Demiyanyushko, I., et al. (2020), “Challenges in Finite Element Modeling of Vehicle-Barrier Collisions: Friction and Large Deformation Phenomena”. International Journal of Crashworthiness, Vol. 25, No. 3, pp. 312-320.
- [6]. Kolesnikova, T. (2021), “Validation of a Material Point Model for Oblique Vehicle Collisions with Cable Barriers”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 147, No. 8.
- [7]. Altair (2022), Radioss Help, Altair HyperWorks 2022.1.
- [8]. Altair (2022), HyperMesh Help, Altair HyperWorks 2022.1.
- [9]. Altair (2022), HyperCrash Help, Altair HyperWorks 2022.1.
- [10]. Klyavin, O., Michailov, A. and Borovkov, A. (2008), “Finite Element Modeling of The Crash-Tests for Energy Absorbing Lighting Columns”. Proceedings of ENOC-2008, Saint Petersburg, Russia.
- [11]. Abdel-Nasser, Y., et al. (2013), “Frontal Crash Simulation of Vehicles Against Lighting Columns in Kuwait Using FEM”. International Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol. 2, No. 5, pp. 101-105. doi: 10.5923/j.ijtte.20130205.02.

PHÂN TÍCH GIẢI PHÁP TỐI ƯU HÓA CÔNG SUẤT CỦA BỘ THU HỒI NĂNG LƯỢNG PIEZOELECTRIC XẾP LỚP TÍCH HỢP TRÊN HỆ THỐNG TREO Ô TÔ

ANALYSIS OF OPTIMIZATION SOLUTIONS FOR THE POWER OUTPUT OF A LAYERED PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER INTEGRATED INTO AUTOMOBILE SUSPENSION SYSTEMS

Trần Văn Mạnh

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: tvmanh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu về phương pháp tối ưu hóa công suất thu được từ các bộ thu hồi năng lượng piezoelectric xếp lớp (Stacked Piezoelectric Energy Harvesters - SPEH) được tích hợp trong hệ thống treo của ô tô. Mục tiêu nhằm khai thác chuyển động dao động trong hệ thống treo để tạo ra năng lượng điện một cách hiệu quả. Mô hình điện cơ liên kết được phát triển để mô phỏng tương tác giữa thiết bị thu năng lượng và hệ thống treo. Các chiến lược tối ưu như điều chỉnh trở kháng tải, lực nén sơ bộ và cấu trúc hình học của thiết bị được phân tích nhằm tối đa hóa công suất đầu ra. Kết quả cho thấy các thiết bị SPEH có khả năng đóng góp một phần năng lượng đáng kể cho các hệ thống điện tử trên xe, đặc biệt trong các xe điện và xe lai.

Từ khóa: Thu hồi năng lượng; Xe điện; Mô hình điện cơ.

ABSTRACT

This paper presents a study on optimizing the power generation from stacked piezoelectric energy harvesters (SPEHs) integrated into automotive suspension systems. The objective is to efficiently harness vibrational motion within the suspension to generate electrical energy. A coupled electromechanical model is developed to simulate the interaction between the energy harvester and the suspension system. Optimization strategies such as load impedance matching, pre-compression force, and harvester geometry are analyzed to maximize power output. Results demonstrate the potential of SPEHs to contribute a significant portion of energy to onboard electronic systems, particularly in electric and hybrid vehicles.

Keywords: Energy harvesting; Electric vehicles; Electromechanical model.



1. GIỚI THIỆU

Trong những thập kỷ gần đây, việc thu năng lượng từ các nguồn sẵn có trong môi trường xung quanh như rung động, nhiệt, ánh sáng, bức xạ, gió và nước, và chuyển đổi chúng thành năng lượng điện để thay thế việc sử dụng nguồn điện từ lưới hoặc pin cho các thiết bị điện tử công suất thấp như cảm biến hay thiết bị đo lường trong xe cộ, thiết bị công trình hay các bộ phận sinh học nhân tạo đã và đang được quan tâm nghiên cứu rộng rãi. Một trong những nguồn năng lượng hao phí tiềm năng đó là rung động từ môi trường xung quanh. Xu hướng điện hóa và phát triển các giải pháp tiết kiệm năng lượng trong ngành công nghiệp ô tô đang thúc đẩy nhu cầu nghiên cứu các hệ thống thu hồi năng lượng [1]. Một trong những nguồn năng lượng tiềm năng là dao động sinh ra từ chuyển động của hệ thống treo xe trong quá trình vận hành. Vật liệu piezoelectric, với khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học thành điện năng, là lựa chọn hấp dẫn do tính bền vững, mật độ năng lượng cao và không cần bảo trì.

Các thiết bị piezoelectric truyền thống dạng đơn lớp thường bị giới hạn về biên độ ứng suất và điện áp đầu ra [1, 2]. Do đó, cấu trúc xếp lớp (stacked configuration) được đề xuất để cải thiện mật độ công suất, đồng thời vẫn đảm bảo tính bền cơ học khi tích hợp vào hệ thống treo [3, 4]. Tuy nhiên, do tính chất phi tuyến và ảnh hưởng từ điều kiện vận hành thực tế, việc

tối ưu hóa SPEH là cần thiết để đạt hiệu suất cao nhất.

Năng lượng tiêu tán ở hệ thống treo trước thường cao hơn khoảng 35% so với hệ thống treo sau do độ cứng lò xo và hệ số giảm chấn của hệ thống treo trước lớn hơn [5]. Việc tăng khối lượng xe, tăng hệ số giảm chấn hay giảm độ cứng lò xo đều dẫn đến tăng năng lượng tiêu tán [6]. Mấp mô mặt đường cũng ảnh hưởng đáng kể đến năng lượng tiêu tán từ hệ thống treo [5, 6]. Theo Abdelkareem và cộng sự [7], ở tốc độ xe 20-50 km/h trên đường bằng phẳng, giảm chấn thông thường tiêu tán công suất từ 10-90W. Khi có mấp mô, công suất tiêu tán tăng lên 40-140W ở cùng tốc độ [7].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

2.1. Các nghiên cứu về trang thiết bị thu hồi năng lượng từ hệ thống treo

Hiện nay chưa có mẫu xe thương mại lắp đặt hệ thống thu hồi năng lượng từ hệ thống treo, tuy nhiên các nghiên cứu đã được tiến hành và thử nghiệm, mang lại tiềm năng lớn cho ứng dụng này trên các xe ô tô.

Dưới đây là bảng 1 giới thiệu các hệ thống giảm xóc điện từ thu hồi năng lượng từ các nghiên cứu [6, 8, 9, 10].

Bảng 1. Dự án nghiên cứu phát triển thu hồi năng lượng từ hệ thống treo

Tên dự án / Nghiên cứu	Tổ chức phát triển	Công nghệ chính	Công suất thu hồi (ước tính)	Ứng dụng thử nghiệm	Tình trạng thương mại hóa
GenShock	Levant Power + ZF Friedrichshafen	Điện từ + thủy lực, dùng máy phát + van điều khiển	3-6 kW (xe tải/ xe quân sự)	Xe quân sự Humvee, xe tải	Chưa thương mại hóa, dùng phát triển

Bose Suspension System	Tập đoàn Bose	Điện từ điều khiển chủ động, không ưu tiên thu năng lượng	Không công bố cụ thể	Xe thử nghiệm (Lexus, Audi)	Không thương mại hóa do chi phí cao
Đại học Tufts	Đại học Tufts (MIT liên quan)	Nam châm vĩnh cửu + cuộn dây, chuyển dao động thành điện năng	20-70% năng lượng dao động bị mất	Xe tải, xe quân sự (giai đoạn lab)	Đã cấp phép cho startup, chưa thương mại
Đại học Swinburne	Đại học Swinburne (Úc)	Động cơ điện DC làm phần tử giảm chấn, có điều chỉnh điện trở tải	Không công bố cụ thể	Mô hình thử nghiệm trong phòng lab	Chưa thương mại hóa
MIT (Hydraulic-electromagnetic)	Viện MIT	Piston thủy lực → tuabin quay máy phát điện	Tiết kiệm 1-2% nhiên liệu xe tải	Xe tải, xe quân sự	Mức nguyên mẫu, chưa thương mại hóa

2.2. Các lĩnh vực ứng dụng

Từ các đặc điểm phân tích ở trên, tiềm năng của giải pháp thu hồi năng lượng từ hệ thống treo được giới thiệu trên bảng 2.

Bảng 2. Tiềm năng các giải pháp thu hồi năng lượng từ hệ thống treo

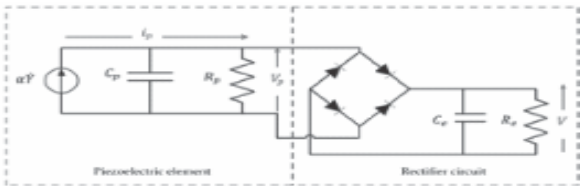
Phân khúc xe	Giải pháp tiềm năng	Lý do
Xe tải, xe quân sự	GenShock, MIT hydraulic-electromagnetic	Rung động lớn, đủ không gian lắp đặt, nhu cầu điện năng cao
Xe con cao cấp	Bose (nếu cần sự thoải mái, không ưu tiên thu năng lượng)	Chất lượng lái ưu tiên hơn hiệu suất năng lượng
Xe điện dân dụng	Tufts / Swinburne (đơn giản, nhẹ, dễ sản xuất)	Phù hợp mô hình thu hồi năng lượng nhẹ, hỗ trợ pin xe

3. MÔ HÌNH HỆ THỐNG VÀ KẾT QUẢ

3.1. Mô hình hệ thống

Một mô hình hệ thống treo kiểu một phần tư xe (quarter-car model) được sử dụng, trong đó bộ SPEH được gắn song song với giảm xóc [11, 12]. Thiết bị thu năng lượng được mô phỏng dựa trên phương trình liên kết giữa biến dạng cơ học và điện áp đầu ra của vật

liệu piezoelectric. Tác động từ mặt đường được mô phỏng bằng tín hiệu dao động đầu vào tại vị trí tiếp xúc bánh xe.



Hình 1. Sơ đồ mạch điện thu hồi năng lượng điện [13]

Các tham số chính thường được đưa vào phân tích gồm [5, 6, 13]:

- + Cấu hình xếp lớp: Số lớp, loại vật liệu.
- + Lực nén sơ bộ: Ảnh hưởng đến độ nhạy dao động.
- + Trở kháng tải: Nhằm đảm bảo ghép trở tối ưu với mạch điện.
- + Hình học khối piezo: Diện tích mặt cắt, chiều cao.

Giải thuật được áp dụng để tìm tập hợp thông số tối ưu, nhằm cực đại hóa công suất đầu ra đồng thời đảm bảo độ bền cơ học và giảm thiểu khối lượng bổ sung.

3.2. Kết quả và thảo luận

Các nghiên cứu thử nghiệm mô phỏng [14] và thực nghiệm trên nguyên mẫu thu nhỏ [15, 16] của các tác giả cho thấy:

- + Tối ưu trở kháng tải giúp tăng hiệu suất chuyển đổi năng lượng lên đến 25%.
- + Điều chỉnh lực nén sơ bộ có ảnh hưởng mạnh đến phổ tần số đáp ứng của SPEH, cho phép tối ưu hóa phù hợp với điều kiện mặt đường cụ thể.
- + Số lớp piezo tăng giúp tăng điện áp đầu ra tuyến tính, tuy nhiên hiện tượng bão hòa xuất hiện khi số lớp quá lớn do giới hạn cơ học.

Dưới điều kiện lái xe đô thị tiêu chuẩn, mỗi thiết bị SPEH có thể tạo ra công suất 120-150 mW, có thể nâng cấp theo số lượng thiết bị lắp trên mỗi bánh xe. Thiết bị hoạt động hiệu quả nhất khi xe đi qua các mặt đường định kỳ như gờ giảm tốc, đường đá dăm, nơi dao động có biên độ lớn và tần số rõ ràng [15].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu tổng quan về thu hồi năng lượng dao động trên ô tô cho thấy tiềm năng của các bộ thu hồi năng lượng piezoelectric xếp lớp trong việc tái sử dụng năng lượng dao động từ hệ thống treo ô tô. Thông qua các chiến lược tối ưu về hình học, lực nén và trở kháng tải, công suất đầu ra có thể được nâng cao đáng kể. Trong tương lai, nghiên cứu sẽ tập trung vào việc xây dựng mô hình mô phỏng điều khiển thích nghi các tham số của thiết bị trong thời gian thực và tích hợp vào hệ thống quản lý năng lượng tổng thể của phương tiện để có thể đánh giá sâu hơn về giải pháp thu hồi năng lượng dao động này.

Ngày nhận bài: **28/4/2025**

Ngày phản biện: **08/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Abdelkareem MAA, Xu L, Ali MKA, Elagouz A, Mi J, Guo S, et al., “*Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review*”. Appl. Energy 2018;229:672-99. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.030>.
- [2]. Howells CA, “*Piezoelectric energy harvesting*”. Energy Convers Manag 2009;50:1847-50. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2009.02.020>.
- [3]. Clementino MA, Reginatto R, Da Silva S, “*Modeling of piezoelectric energy harvesting considering the dependence of the rectifier circuit*”. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2014;36:283-92. <https://doi.org/10.1007/S40430-013-0070-6>.
- [4]. Al Ahmad M, Alshareef HN, “*Modeling the power output of piezoelectric energy harvesters*”. J Electron Mater 2011;40:1477-84. <https://doi.org/10.1007/S11664-011-1631-Z>.
- [5]. Wei C, Taghavifar H, “*A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension*

- system: *Half-vehicle model*". Energy 2017;134:279-88. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.06.034>.
- [6]. Jacota V-G, "Evaluation the Dissipated Energy by the Automobile Dampers". Global Journals of Research in Engineering 2016;16:5-11.
- [7]. Abdelkareem MAA, Xu L, Ahmed Ali MK, Hassan MA, Elagouz A, Zou J, "On-Field Measurements of the Dissipated Vibrational Power of an SUV Car Traditional Viscous Shock Absorber". Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference 2018;3. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85148>.
- [8]. "Design and Analysis of Shock Absorber: A Review". ScienceDirect n.d. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478531733033X> (accessed May 22, 2025).
- [9]. Singh WS, Srilatha N, "Design and Analysis of Shock Absorber: A Review". Mater Today Proc 2018;5:4832-7. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.12.058>.
- [10]. Anton SR, Sodano HA, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)". Smart Mater Struct 2007;16. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/3/R01>.
- [11]. Wang W, Yang T, Chen X, Yao X, "Vibration energy harvesting using a piezoelectric circular diaphragm array". IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control 2012;59:2022-6. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2422>.
- [12]. Dynamic AA, Ali AK, Abdulwahhab Abdulrazzaq A, Mohsin AH, "A Dynamic Simulation of a Piezoelectric Energy-Harvesting System Integrated with a Closed-Loop Voltage Source Converter for Sustainable Power Generation". Processes 2024, Vol 12, Page 2198 2024;12:2198. <https://doi.org/10.3390/PR12102198>.
- [13]. Darabseh T, Al-Yafeai D, Mourad A-HI, "Energy harvesting from car suspension system: Mathematical approach for half car model". Journal of Mechanical Engineering and Sciences 2021;15:7695-714. <https://doi.org/10.15282/JMES.15.1.2021.07.0607>.
- [14]. Xu Y, Xian T, Chen C, Wang G, Wang M, Shi W, "Mathematical modeling and parameter optimization of a stacked piezoelectric energy harvester based on water pressure pulsation". Energy 2024;292:130530. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.130530>.
- [15]. Zhang B, Zhou H, Zhao X, Gao J, Zhou S, "Design and experimental analysis of a piezoelectric energy harvester based on stacked piezoceramic for nonharmonic excitations". Energy 2023;282:128948. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128948>.
- [16]. Zhang B, Liu H, Li D, Liang J, Gao J, "Analytical Modeling and Validation of a Preloaded Piezoceramic Current Output". Micromachines 2021, Vol 12, Page 353 2021;12:353. <https://doi.org/10.3390/M12040353>.

PHÂN TÍCH ỨNG DỤNG HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG KHÍ NÉN TRONG LĨNH VỰC CƠ ĐIỆN TỬ

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF PNEUMATIC DRIVE SYSTEMS IN THE
FIELD OF MECHATRONICS

Nguyễn Tiến Dũng

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: dungnt@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này tổng quan về các phương pháp điều khiển cho hệ thống truyền động khí nén, tập trung vào ứng dụng trong cơ điện tử. Bài báo phân tích ba loại phương pháp điều khiển chính: điều khiển cổ điển (PID), điều khiển hiện đại (LQR, MPC), và điều khiển thông minh (Fuzzy, ANN, và các phương pháp lai). Mỗi phương pháp được đánh giá ưu điểm, nhược điểm và phạm vi ứng dụng. Bài báo cũng đề cập đến các ứng dụng trong robot công nghiệp, robot mềm, truyền động chính xác, và khung xương trợ lực. Bài báo nhấn mạnh sự cần thiết của việc tích hợp cảm biến, học máy và công nghệ song sinh số vào thiết kế điều khiển tương lai cho hệ thống truyền động khí nén để tối ưu hóa hiệu quả và mở rộng khả năng ứng dụng.

Từ khóa: Truyền động khí nén; Robot công nghiệp.

ABSTRACT

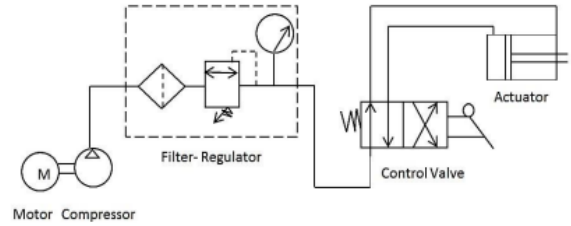
This study presents a review of control methodologies employed in pneumatic actuation systems, with an emphasis on mechatronic applications. Three primary control paradigms are examined: classical control (predominantly PID), modern control (including LQR and MPC), and intelligent control (fuzzy logic, artificial neural networks, and hybrid schemes). The strengths, weaknesses, and suitability of each approach are evaluated. The study further considers applications within industrial robotics, soft robotics, precision motion control, and powered exoskeletons. The necessity of integrating sensor technologies, machine learning capabilities, and digital twin modelling into future pneumatic drive system control designs is underscored to achieve optimal performance and expand the range of practical applications.

Keywords: Pneumatic drive; Industrial robots.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, các hệ thống truyền động sử dụng cơ cấu chấp hành khí nén (pneumatic actuators) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp và robot nhờ ưu điểm về cấu trúc đơn giản, trọng lượng nhẹ, chi phí thấp và khả năng hoạt động trong môi trường khắc nghiệt [1, 2]. Tuy nhiên, đặc tính phi tuyến mạnh, độ nén của khí và các hiệu ứng trễ động lực khiến việc thiết kế bộ điều khiển cho các hệ thống truyền động khí nén trở nên đặc biệt phức tạp [3]. Cụ thể, tính phi tuyến này bắt nguồn từ một số yếu tố chính: (1) Lực ma sát cao: Ma sát trong các thành phần cơ khí của hệ thống khí nén có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác và hiệu suất của hệ thống; (2) Khả năng nén của không khí: Tính chất nén của không khí dẫn đến động lực học hệ thống phức tạp và khó dự đoán; và (3) Vùng chết (dead band): Sự tồn tại vùng chết trong van điều khiển làm giảm độ chính xác và độ nhạy của hệ thống. Do những tính chất phi tuyến này, việc sử dụng các bộ điều khiển thông thường như PID đơn giản thường không mang lại hiệu quả cao.

Nhiều phương pháp điều khiển khác nhau đã được nghiên cứu để cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của các cơ cấu chấp hành khí nén, bao gồm điều khiển PID mở rộng [4], điều khiển thích nghi [5], điều khiển mờ và mạng nơ-ron nhân tạo [6], cũng như điều khiển tối ưu như LQR và MPC [7]. Tuy nhiên, không có một giải pháp điều khiển duy nhất nào có thể áp dụng hiệu quả cho tất cả các loại tải và điều kiện vận hành khác nhau. Do đó, việc tổng hợp và đánh giá các phương pháp điều khiển hiện có đóng vai trò quan trọng trong việc xác định xu hướng nghiên cứu và ứng dụng trong tương lai.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống điều khiển khí nén [5]

Mục tiêu của bài báo này là trình bày một cái nhìn tổng quan toàn diện về các phương pháp thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống truyền động bằng cơ cấu chấp hành khí nén, phân tích ưu nhược điểm của từng phương pháp, đồng thời đề xuất các hướng nghiên cứu tiềm năng nhằm nâng cao hiệu quả điều khiển và khả năng ứng dụng thực tế.

2. TỔNG QUAN VÀ ĐÁNH GIÁ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN

2.1. Điều khiển cổ điển

Phương pháp phổ biến nhất là PID nhờ cấu trúc đơn giản, triển khai dễ dàng trong công nghiệp. Tuy nhiên, đối với hệ thống khí nén với tính phi tuyến và trễ thời gian, PID truyền thống không đảm bảo hiệu quả điều khiển [1]. Các biến thể như PID thích nghi hay PID theo mô hình giúp cải thiện khả năng bù phi tuyến [2].

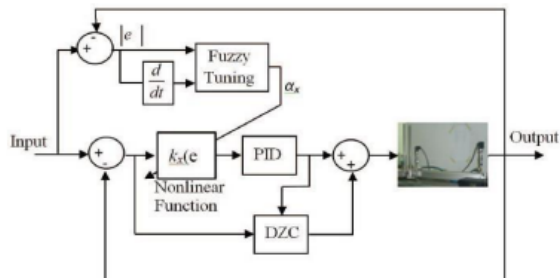
2.2. Điều khiển hiện đại

Các phương pháp như LQR và MPC tối ưu hành vi hệ thống theo hàm chi phí. LQR mang lại đáp ứng nhanh nhưng phụ thuộc mô hình chính xác. MPC linh hoạt hơn nhưng tính toán phức tạp [3], [4]. Các phương pháp thích nghi như MRAC hay Adaptive Backstepping có thể tự bổ sung sự thay đổi tham số, bù phi tuyến [5].



2.3. Điều khiển thông minh

Phương pháp như mờ (Fuzzy) và mạng nơ-ron (ANN) giúp xử lý hệ thống phi tuyến không cần mô hình. Các phương pháp lai như PID-Fuzzy, ANN-PID kết hợp ưu điểm các loại điều khiển [6], [7].



Hình 2. Cấu trúc điều khiển MN-PID [5]

2.4. So sánh các phương pháp với nhau

Phương pháp	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng
PID truyền thống	Dễ triển khai, tính toán đơn giản	Kém ở môi trường phi tuyến	Cao
PID thích nghi	Cải thiện khi tải thay đổi	Khó thiết lập tham số	Trung bình
LQR	Ổn định, nhanh	Cần mô hình chính xác	Trung bình
MPC	Xử lý ràng buộc tốt	Tính toán nặng	Thấp
Thích nghi	Bù phi tuyến tự động	Dễ mất ổn định nếu sai mô hình	Trung bình
Fuzzy/ ANN	Không cần mô hình	Yêu cầu huấn luyện, khó giải thích	Trung bình
Lai	Kết hợp ưu điểm	Thiết kế phức tạp	Trung-Cao

3. ỨNG DỤNG TRONG CƠ KHÍ VÀ CƠ ĐIỆN TỬ

3.1. Robot công nghiệp, cobots

Dùng trong tay gấp, trục truyền động, thiết bị thao tác sản phẩm. Các bộ điều khiển thích nghi giúp tăng độ an toàn khi robot làm việc cùng người [1].

3.2. Robot mềm, thiết bị y sinh

Cơ trúc dễ biến dạng, dùng trong phục hồi chức năng, thao tác vật dễ vỡ. Điều khiển fuzzy, MPC, hay ANN giúp tăng hiệu suất [2], [3].

3.3. Truyền động chính xác

Trong CNC, máy đóng gói, thiết bị gá, các bộ PID nâng cao hoặc LQR giúp cân bằng độ chính xác và tốc độ [4].

3.4. Khung xương trợ lực, tay giả

Dùng của khí nén để hỗ trợ vận động, các bộ điều khiển điều chỉnh theo phản hồi sinh học giúp tạo cảm giác tự nhiên và an toàn hơn [5].

4. KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Bài báo này đã tổng quan về các thiết kế bộ điều khiển được sử dụng phổ biến cho hệ thống truyền động khí nén, tập trung vào ba loại chính: PID, SMC và Adaptive Control. Các hệ thống này, mặc dù có chi phí thấp và dễ bảo trì, lại gặp khó khăn do tính phi tuyến vốn có, bao gồm ma sát cao, độ nén của không khí và hiện tượng vùng chết. Bài báo đã tổng hợp các phương pháp điều khiển được áp dụng trong hệ

thống truyền động sử dụng cơ cấu chấp hành khí nén, từ cổ điển đến hiện đại và thông minh. Mỗi phương pháp đều có những thế mạnh và hạn chế riêng, tùy thuộc vào đặc tính tải, độ phi tuyến và mục tiêu điều khiển.

Trong tương lai, các hướng nghiên cứu tiềm năng bao gồm:

+ Phát triển các thuật toán điều khiển thích nghi thông minh lai để xử lý hiệu quả trong môi trường biến động.

+ Tăng cường tích hợp cảm biến và học máy để dự đoán và điều chỉnh hành vi hệ thống theo thời gian thực.

+ Ứng dụng công nghệ song sinh số (digital twin) cho mô phỏng và điều chỉnh điều khiển tối ưu.

+ Tối ưu hóa chi phí tính toán cho các bộ điều khiển MPC và học sâu nhằm ứng dụng trong hệ thống nhúng thực tế.

Các nghiên cứu này sẽ góp phần nâng cao hiệu quả điều khiển, mở rộng khả năng ứng dụng của hệ thống khí nén trong sản xuất thông minh và y tế tương lai.❖

Ngày nhận bài: **28/4/2025**

Ngày phản biện: **07/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyen, Q. H., et al., “A survey on pneumatic actuators for soft robotics”. *Actuators*, vol. 9, no. 1, pp. 1-20, 2020.
- [2]. Wang, X., et al., “Modeling and control of pneumatic actuators”. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 1-15, 2018.
- [3]. Richer, E., and Hurmuzlu, Y., “A high performance pneumatic force actuator system: Part I – Nonlinear mathematical model”. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 122, no. 3, pp. 416-425, 2000.
- [4]. Shearer, J. L., “Study of pneumatic processes in the continuous control of motion with compressed air – Part 2: Controlled velocity and position systems”. *Transactions of the ASME*, vol. 78, pp. 233-249, 1956.
- [5]. Rydén, M., and Wikander, J., “Adaptive control of a pneumatic servo system using backstepping”. *Control Engineering Practice*, vol. 10, no. 5, pp. 567-576, 2002.
- [6]. Smaoui, M. R., et al., “Fuzzy logic control of a pneumatic artificial muscle actuator system”. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 1, pp. 75-82, 2011.
- [7]. Liu, Y., and Goldenberg, A. A., “Modeling and control of a pneumatic actuator with neural network compensation”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 3, pp. 409-418, 2004.

TIỀM NĂNG SỬ DỤNG NANO GRAPHENE CẢI THIỆN HIỆU QUẢ LÀM VIỆC TRONG DÂY CHUYỀN TỰ ĐỘNG HÓA SẢN XUẤT Ô TÔ

POTENTIAL OF USING NANO-GRAPHENE TO IMPROVE WORKING EFFICIENCY IN AUTOMATED AUTOMOBILE PRODUCTION LINES

Trần Văn Mạnh

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: tvmanh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Hạt nano graphene (GNPs) đã thu hút sự chú ý đáng kể nhờ vào những tính chất đặc biệt, bao gồm độ bền cơ học cao, khả năng dẫn điện tuyệt vời và diện tích bề mặt lớn. Những tính chất này khiến GNPs trở thành ứng cử viên tiềm năng cho một loạt các ứng dụng, đặc biệt trong các lĩnh vực vật liệu học, cơ khí và cơ điện tử. Trong bài viết này, đưa đến khám phá các phương pháp tổng hợp, tính chất vật lý, và các ứng dụng tiềm năng của GNPs trong việc cải thiện hiệu suất của các hệ thống cơ khí, cảm biến điện tử, và quy trình tự động hóa trong ngành sản xuất ô tô. Bài báo thảo luận về những thách thức trong việc tổng hợp và phân tán GNPs, cùng với tác động của chúng đối với hiệu quả và độ tin cậy của các hệ thống cơ điện tử. Bài viết cũng nêu bật những hướng nghiên cứu tương lai nhằm tối ưu hóa việc sử dụng GNPs trong các ứng dụng công nghiệp.

Từ khóa: Nano graphene; Sản xuất ô tô; Hệ thống cơ điện tử.

ABSTRACT

Graphene nanoparticles (GNPs) have garnered significant attention due to their exceptional properties, including high mechanical strength, excellent electrical conductivity, and large surface area. These characteristics make GNPs promising candidates for a wide range of applications, particularly in materials science, mechanical engineering, and mechatronics. In this paper, we explore synthesis methods, physical properties, and the potential applications of GNPs in enhancing the performance of mechanical systems, electronic sensors, and automation processes in the automotive manufacturing industry. We also discuss the challenges associated with the synthesis and dispersion of GNPs, along with their impact on the efficiency and reliability of mechatronic systems. The article highlights future research directions aimed at optimizing the use of GNPs in industrial applications.

Keywords: Nano graphene; Automobile manufacturing; Mechatronic systems.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong vài thập kỷ gần đây, sự phát triển nhanh chóng của công nghệ nano đã thúc đẩy nghiên cứu và ứng dụng các vật liệu nano trong nhiều lĩnh vực khoa học và kỹ thuật. Trong số các vật liệu này, graphene – một dạng allotrope của carbon có cấu trúc lưới tổ ong hai chiều – đã thu hút sự quan tâm lớn nhờ vào những tính chất vượt trội về cơ học, điện tử, nhiệt học và hóa học. Kể từ khi được tách ra thành công vào năm 2004, graphene và các dẫn xuất của nó, như hạt nano graphene (GNPs), đã mở ra tiềm năng to lớn cho các vật liệu và thiết bị tiên tiến trong các lĩnh vực như điện tử, y sinh, khoa học môi trường và lưu trữ năng lượng.

Graphene là một lớp nguyên tử carbon sắp xếp theo mạng tổ ong hai chiều, với các liên kết sp² bền vững. Cấu trúc này mang lại cho graphene các tính chất vật lý nổi bật như:

- + Hệ số ma sát thấp (~ 0.03) [1], nhờ khả năng trượt dễ dàng giữa các lớp.

- + Độ bền cơ học và khả năng chống mài mòn vượt trội [2].

- + Dẫn nhiệt rất cao (~ 5000 W/mK) [3], giúp giảm hiện tượng quá nhiệt ở vùng ma sát.

- + Tương thích hóa học tốt, đặc biệt khi được biến tính bề mặt để tăng khả năng phân tán trong dầu [4].

Hạt nano graphene, với diện tích bề mặt lớn, khả năng dẫn điện tốt, tính chất cơ học vượt trội và khả năng tương tác bề mặt linh hoạt, đã trở thành ứng viên lý tưởng cho các vật liệu composite. Tuy nhiên, vẫn còn nhiều thách thức liên quan đến việc tổng hợp, đồng nhất kích thước và phân tán GNPs, cũng như

tương tác của chúng với các môi trường khác nhau. Do đó, việc tổng hợp toàn diện về GNPs – từ phương pháp tổng hợp, đặc điểm cấu trúc, tính chất vật lý-hóa học, đến các ứng dụng tiềm năng – là cần thiết để cung cấp cái nhìn toàn diện và hướng nghiên cứu trong tương lai.

2. ỨNG DỤNG TRONG HỆ THỐNG CƠ KHÍ VÀ CƠ ĐIỆN TỬ

Những đặc tính này giúp graphene giảm tiếp xúc kim loại – kim loại trong quá trình ma sát, tạo ra lớp màng bảo vệ siêu mỏng, đồng thời tăng hiệu quả tản nhiệt và kéo dài tuổi thọ thiết bị cơ khí.

Graphene và GNPs mang lại những cải tiến đáng kể trong hiệu suất của các hệ thống cơ khí và cơ điện tử nhờ vào những tính chất cơ học vượt trội. Những hệ thống này, đặc biệt trong tự động hóa công nghiệp và robot, yêu cầu vật liệu nhẹ nhưng mạnh mẽ, linh hoạt và bền bỉ trong điều kiện vận hành khắc nghiệt. Việc tích hợp GNPs vào vật liệu composite đã cho thấy những cải thiện đáng kể về độ bền cơ học, độ cứng và khả năng chịu đựng mài mòn của chúng, điều này rất quan trọng trong các ứng dụng sản xuất như sản xuất ô tô.

2.1. Tăng cường tính chất cơ học của vật liệu composite

Hạt nano graphene ngày càng được sử dụng để tăng cường tính chất cơ học của các vật liệu composite. Việc đưa GNPs vào trong các vật liệu composite này có độ bền kéo, độ cứng uốn và khả năng chống biến dạng tốt hơn rất nhiều. Ví dụ, một lượng nhỏ GNPs có thể làm tăng độ bền kéo của các vật liệu composite polymer lên đến 30% mà không làm giảm tính linh hoạt của chúng [3, 5]. Những cải tiến này

khuyến các composite tăng cường graphene trở thành lựa chọn lý tưởng cho các bộ phận cấu trúc của máy móc, robot và các bộ phận ô tô.

2.2. Cảm biến và thiết bị cơ điện tử

Với khả năng dẫn điện vượt trội và diện tích bề mặt lớn, GNPs cũng được sử dụng trong việc phát triển các cảm biến nhạy bén. Trong các hệ thống cơ điện tử, cảm biến đóng vai trò quan trọng trong việc giám sát và điều khiển các quy trình sản xuất. Việc tích hợp GNPs vào các đồng hồ đo biến dạng, cảm biến lực và cảm biến nhiệt độ giúp nâng cao độ nhạy và độ chính xác của các thiết bị này, điều này là rất cần thiết để có phản hồi và điều khiển chính xác trong các quy trình sản xuất tự động [6-9]. Chẳng hạn, cảm biến dựa trên GNP có thể phát hiện những thay đổi nhỏ nhất trong căng thẳng cơ học hoặc nhiệt độ, cung cấp dữ liệu quý giá để tối ưu hóa hiệu suất trong các hệ thống tự động.

2.3. Tích hợp trong các hệ thống robot

Việc sử dụng GNPs trong các hệ thống robot đã chứng tỏ tiềm năng giảm trọng lượng các bộ phận quan trọng mà vẫn duy trì độ bền và độ ổn định của chúng. Việc tích hợp composite graphene vào các bộ phận như cánh tay robot, cơ cấu thực hiện và các khớp nối giúp giảm trọng lượng của các bộ phận này, cải thiện độ linh hoạt và tốc độ của các hệ thống robot. Ngoài ra, GNPs còn giúp tăng khả năng chống mài mòn và kéo dài tuổi thọ của các bộ phận chuyển động, làm cho chúng đáng tin cậy hơn và giảm nhu cầu bảo trì thường xuyên trong các dây chuyền sản xuất tự động [8, 9].

3. CẢI THIỆN HIỆU QUẢ LÀM VIỆC CỦA HỆ THỐNG CƠ ĐIỆN TỬ TRONG DÂY CHUYỀN TỰ ĐỘNG HÓA SẢN XUẤT Ô TÔ

Trong ngành sản xuất ô tô, tự động hóa đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa quy trình sản xuất, giảm chi phí và nâng cao chất lượng sản phẩm, với hình ảnh được giới thiệu trên Hình 1. Các hệ thống cơ điện tử trong các dây chuyền sản xuất ô tô đòi hỏi độ chính xác cao, khả năng vận hành ổn định và khả năng chịu tải trong môi trường làm việc khắc nghiệt [10]. Việc sử dụng GNPs trong các hệ thống này, với vai trò là phụ gia bôi trơn nhờ vào các đặc tính ma sát vượt trội và tính chất hóa – lý độc đáo, đã chứng minh hiệu quả trong việc cải thiện hiệu suất và hiệu quả làm việc.

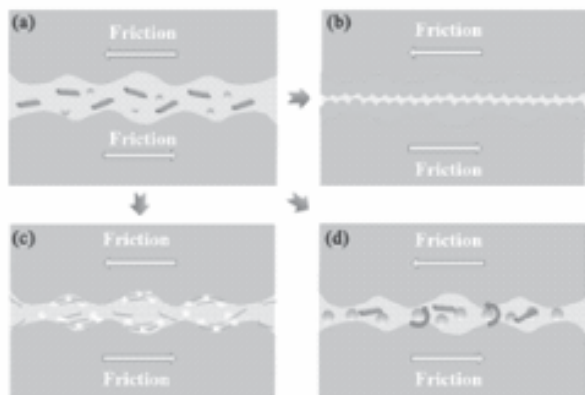


Hình 1. Thành phần tay máy robot đóng vai trò tự động hóa trong dây chuyền sản xuất lắp ráp ô tô

3.1. Tăng cường khả năng chịu tải và chống mài mòn

Vật liệu Graphene có thể được sử dụng để cải thiện khả năng chịu tải và chống mài mòn của các bộ phận cơ khí như bạc đạn, trục và bánh răng, những bộ phận quan trọng trong ngành sản xuất ô tô [11, 12]. Các nghiên cứu cho thấy GNPs có thể cải thiện các tính chất cơ học của vật liệu composite, giúp chúng chịu

được mức độ căng thẳng cao mà không bị biến dạng. Điều này giúp giảm thiểu thời gian bảo trì và kéo dài tuổi thọ của các bộ phận cơ khí trong các hệ thống tự động [2, 5, 13]. Nano graphene làm chất phụ gia trong quá trình bôi trơn, đóng vai trò giảm ma sát, được giới thiệu trên Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ minh họa cơ chế bôi trơn của các chất phụ gia nano graphene: (a) Trạng thái ban đầu; (b) Hình thành màng dầu bôi trơn; (c) Tự bổ sung sửa chữa bề mặt ma sát; (d) Tạo ma sát gần như bằng không với các bề mặt giữa hai bề mặt [14].

Jin và cộng sự [15] đã tổng hợp thành công nanocomposite Mn_3O_4 /graphene (Mn_3O_4 /G) bằng phương pháp thủy nhiệt, sau đó phân tán chúng trong mỡ lithium L-XBCEA0 thông qua khuấy từ, cán ba trục và rung siêu âm. Kết quả thử nghiệm ma sát cho thấy chỉ với lượng nhỏ phụ gia nanocomposite, hệ số ma sát của mỡ bôi trơn đã giảm đáng kể. Trong một nghiên cứu khác, Wang và cộng sự [16] chế tạo nano graphene bằng kỹ thuật vi nhũ tương kết hợp với phương pháp siêu âm, sau đó trộn vào dầu tổng hợp để làm phụ gia bôi trơn. Kết quả cho thấy hiệu suất bôi trơn của dầu nền được cải thiện rõ rệt, đặc biệt ở điều kiện nhiệt độ cao, nhờ hiệu ứng cộng hưởng giữa graphene và hợp chất kim loại. Tương tự, Sun và cộng sự [17] đã tổng hợp nano graphene oxide/ Fe_3O_4 bằng kỹ thuật nhiệt dung môi. Khi

được sử dụng làm phụ gia bôi trơn, vật liệu này thể hiện khả năng phân tán ổn định cao trong môi trường nước, đồng thời cải thiện đáng kể các đặc tính ma sát-giảm hệ số ma sát và đường kính vết mài mòn lần lượt 33,6% và 32,3% so với dầu gốc.

Gần đây, Miao và cộng sự [18] là nhóm nghiên cứu đầu tiên chế tạo màng nano graphene oxide/ Ti_3C_2 bằng phương pháp lắng điện di trên nền silicon. Kết quả thử nghiệm ma sát cho thấy, dưới điện áp 35 V, màng phủ này giúp giảm hệ số ma sát tới 76%, đồng thời tăng khả năng chống mài mòn nhờ vào hiệu ứng cộng hưởng giữa ô xít graphene và Ti_3C_2 .

3.2. Cảm biến cho giám sát chính xác

Việc tích hợp GNPs vào các cảm biến dùng để giám sát biến dạng cơ học, nhiệt độ và áp suất trong các hệ thống tự động hóa sản xuất ô tô giúp nâng cao độ chính xác và độ bền của các cảm biến này. Cảm biến dựa trên GNP có thể hoạt động ổn định trong môi trường có nhiệt độ cao, rung động và các yếu tố cơ học khác, từ đó cung cấp dữ liệu chính xác cho việc điều khiển các quy trình sản xuất. Điều này giúp nâng cao hiệu quả, giảm thiểu lỗi và cải thiện chất lượng sản phẩm trong các dây chuyền sản xuất [6, 19, 20].

3.3. Giảm trọng lượng và tăng tính linh hoạt

Trong ngành sản xuất ô tô, việc giảm trọng lượng của các bộ phận robot, băng tải và các bộ phận cơ khí khác là rất quan trọng để cải thiện tính linh hoạt và hiệu quả năng lượng. Việc sử dụng GNPs trong sản xuất các bộ phận này giúp giảm trọng lượng mà vẫn duy trì được độ bền và độ cứng cần thiết. Điều này không chỉ cải thiện hiệu suất của các hệ thống robot mà còn giúp tiết kiệm năng lượng, vì các hệ

thông nhẹ tiêu thụ ít năng lượng hơn trong quá trình hoạt động [6, 12].

4. KẾT LUẬN

Hạt nano graphene (GNPs) đã chứng minh tiềm năng to lớn trong việc cải thiện hiệu suất của các hệ thống cơ điện tử, đặc biệt trong ngành tự động hóa sản xuất ô tô. Những tính chất vượt trội về cơ học, điện tử và nhiệt học của GNPs khiến chúng trở thành vật liệu lý tưởng cho các ứng dụng trong vật liệu composite, cảm biến và các hệ thống thực hiện. GNPs giúp cải thiện hiệu quả, độ tin cậy và tuổi thọ của các bộ phận cơ khí, đồng thời giảm trọng lượng và nâng cao độ chính xác của các quy trình tự động. Tuy nhiên, việc tổng hợp và phân tán GNPs vẫn còn một số thách thức cần được giải quyết để việc ứng dụng chúng rộng rãi hơn trong công nghiệp.

5. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TƯƠNG LAI

Các nghiên cứu tương lai về GNPs nên tập trung vào một số hướng chính sau:

+ Cải thiện phương pháp tổng hợp và phân tán GNPs: Cần phát triển các phương pháp tổng hợp hiệu quả hơn và có thể mở rộng quy mô để kiểm soát kích thước và phân tán đồng đều của GNPs trong các vật liệu composite. Điều này sẽ giúp tăng cường các tính chất của vật liệu.

+ Tối ưu hóa ứng dụng trong sản xuất ô tô và hệ thống cơ điện tử: Các nghiên cứu sâu hơn về việc tích hợp GNPs vào các cảm biến và hệ thống robot trong tự động hóa sản xuất ô tô là cần thiết để nâng cao hiệu quả và giảm chi phí vận hành.

+ Tăng cường khả năng tái chế và bền

vững: Cần nghiên cứu các phương pháp tái chế GNPs trong các ứng dụng công nghiệp để giảm thiểu chi phí và tác động môi trường.

+ Hệ thống năng lượng: GNPs có thể được nghiên cứu thêm trong các hệ thống năng lượng hiệu suất cao như pin lithium-ion, siêu tụ điện và hệ thống lưu trữ năng lượng.

+ Hệ thống tự động hóa thông minh: Tích hợp GNPs vào các hệ thống tự động hóa thông minh sẽ mở ra cơ hội mới cho việc giám sát và điều khiển quy trình sản xuất tự động trong môi trường thay đổi liên tục.❖

Ngày nhận bài: **28/4/2025**

Ngày phản biện: **07/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lee SJ, Yoon SJ, Jeon IY, “*Graphene/Polymer Nanocomposites: Preparation, Mechanical Properties, and Application*”. *Polymers (Basel)* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/POLYM14214733>.
- [2]. Bukvić M, Gajević S, Skulić A, Savić S, Ašonja A, Stojanović B, “*Tribological Application of Nanocomposite Additives in Industrial Oils*”. *Lubricants* 2024, Vol 12, Page 6 2023;12:6. <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS12010006>.
- [3]. Gaidukevic J, Barkauskas J, “*Advanced Technologies in Graphene-Based Materials*”. *Crystals (Basel)* 2024;14:769. <https://doi.org/10.3390/CRYST14090769>.
- [4]. Yang K, Wu C, Zhang G, “*A state of review for graphene-based materials in preparation methods, characterization, and properties*”. *Materials Science and Engineering: B* 2024;310. <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2024.117698>.
- [5]. Dubey A, Dave S, Lakhani M, Sharma A, “*Applications of graphene for communication, electronics and medical fields: A review*”. *International Conference on Electrical,*

- Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016 2016:2435-9. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755131>.
- [6]. Mehmood A, Mubarak NM, Khalid M, Walvekar R, Abdullah EC, Siddiqui MTH, et al, “Graphene based nanomaterials for strain sensor application - A review”. J Environ Chem Eng 2020;8. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.103743>.
- [7]. Faruque MA Al, Syduzzaman M, Sarkar J, Bilisik K, Naebe M, “A Review on the Production Methods and Applications of Graphene-Based Materials”. Nanomaterials 2021, Vol 11, Page 2414 2021;11:2414. <https://doi.org/10.3390/NANO11092414>.
- [8]. Thangam Dhanabalan. Advancements in intelligent process automation 2025:776.
- [9]. Sundar S, Nitin S, “Emerging Trends of Graphene-Based Nanomaterials as Digital Materials for Data Generation in Industry 4.0”. https://ServicesIgi-GlobalCom/Resolvedoi/ResolveAspx?Doi=104018/979-8-3693-5380-6Ch013_1AD:325-58. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5380-6.CH013>.
- [10]. Nagendramma P, Kaul S, “Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012;16:764-74. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.09.002>.
- [11]. Kandasamy R, “Graphene-based Nanocomposites for Automotive and Off-highway Vehicle Applications: A Review”. Current Mechanics and Advanced Materials 2022;2:e290422204291. <https://doi.org/10.2174/2666184502666220429134113>.
- [12]. Das PP, Chaudhary V, “Application of Graphene-Based Biopolymer Nanocomposites for Automotive and Electronic Based Components”, 2021:311-23. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9180-8_17.
- [13]. Voevodin AA, O'Neill JP, Zabinski JS, “Nanocomposite tribological coatings for aerospace applications”. Surf Coat Technol 1999;116-119:36-45. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00228-5).
- [14]. Gao Q, Liu S, Hou K, Li Z, Wang J, “Graphene-Based Nanomaterials as Lubricant Additives: A Review”. Lubricants 2022;10. <https://doi.org/10.3390/LUBRICANTS10100273>.
- [15]. Jin B, Chen G, Zhao J, He Y, Huang Y, Luo J, “Improvement of the lubrication properties of grease with Mn_3O_4 /graphene (Mn_3O_4 /G) nanocomposite additive”. Friction 2021;9:1361-77. <https://doi.org/10.1007/S40544-020-0412-1/METRICS>.
- [16]. Wang J, Zhuang W, Yan T, Liang W, Li T, Zhang L, et al, “Tribological performances of copper perrhenate/graphene nanocomposite as lubricating additive under various temperatures”. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 2021;100:296-309. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2021.05.009>.
- [17]. Sun J, Ge C, Wang C, Li S, “Tribological behavior of graphene oxide- Fe_3O_4 nanocomposites for additives in water-based lubricants”. Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures 2022;30:863-72. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2022.2031166>;JOURNAL:JOURNAL:LFNN19;WGROU:STRIN G:PUBLICATION.
- [18]. Miao X, Liu S, Ma L, Yang Y, Zhu J, Li Z, et al, “ Ti_3C_2 -graphene oxide nanocomposite films for lubrication and wear resistance”. Tribol Int 2022;167:107361. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.107361>.
- [19]. Zhao Q, Gan Z, Zhuang Q, “Electrochemical sensors based on carbon nanotubes”. Electroanalysis 2002;14:1609-13. <https://doi.org/10.1002/ELAN.200290000>.
- [20]. Liu J, Bao S, Wang X, Duong Ngo H, Zhou G, Luo N, et al, “Applications of Graphene-Based Materials in Sensors: A Review”. Micromachines 2022, Vol 13, Page 184, 2022;13:184. <https://doi.org/10.3390/MI13020184>.

NGHIÊN CỨU PHÁT HIỆN LỖI CHO SẢN PHẨM THÂN NHỰA CẦU LÔNG DỰA TRÊN KỸ THUẬT UNWARPPING

A STUDY ON DEFECT DETECTION IN PLASTIC SHUTTLECOCK BODIES USING
AN IMAGE UNWARPING METHOD

Trần Quang Phước

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Email: tqphuoc@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Sự tiến bộ của công nghệ sản xuất đã làm gia tăng nhu cầu về các hệ thống kiểm tra chất lượng (QC) tự động, đặc biệt là trong việc kiểm tra các vật thể có hình dạng phức tạp như sản phẩm ép phun dạng cầu. Các phương pháp kiểm tra truyền thống phải đối mặt với những thách thức đáng kể khi xử lý các bề mặt cong, nguyên nhân là do sự biến dạng hình học vốn có trong các hệ thống ghi hình 2D thông thường. Bài báo này trình bày một phương pháp tiếp cận toàn diện để phát hiện lỗi trên sản phẩm ép phun dạng cầu, bằng cách sử dụng các kỹ thuật làm phẳng ảnh tiên tiến. Phương pháp được đề xuất giải quyết các thách thức cơ bản của việc hiệu chỉnh biến dạng hình học thông qua các mô hình toán học, trong đó tích hợp cơ chế bù trừ biến dạng xuyên tâm và tiếp tuyến, phép biến đổi phối cảnh, và các thuật toán chuyên dụng để phân tích bề mặt cong. Kết quả kiểm nghiệm thực tế cho thấy sự cải thiện đáng kể về độ chính xác trong việc phát hiện lỗi, đạt tỷ lệ phát hiện 98.5% và đồng thời giảm 72% tỷ lệ lỗi so với các phương pháp kiểm tra thông thường.

Từ khóa: Làm phẳng ảnh; Phát hiện lỗi dạng cầu; OpenCV; Hiệu chỉnh biến dạng hình học; Kiểm soát chất lượng; Thị giác máy; Kiểm tra bề mặt.

ABSTRACT

The advancement of manufacturing technology has intensified the demand for automated quality control systems, particularly in the inspection of complex geometries such as spherical molded products. Traditional inspection methods face significant challenges when dealing with curved surfaces due to geometric distortion inherent in conventional 2D imaging systems. This paper presents a comprehensive approach to spherical mold defect detection utilizing advanced image unwarping techniques. The proposed methodology addresses the fundamental challenges of geometric distortion correction through mathematical models incorporating radial and tangential distortion compensation, perspective transformation, and specialized algorithms for curved surface analysis. Experimental validation demonstrates significant improvements in defect detection accuracy, achieving detection rates of 98.5% while reducing false positive rates by 72% compared to conventional inspection methods.

Keywords: Image Unwarping; Spherical Defect Detection; OpenCV; Geometric Distortion Correction; Quality Control; Machine Vision; Surface Inspection.

1. GIỚI THIỆU

Việc chế tạo các chi tiết dạng cầu thông qua quy trình ép phun đặt ra những thách thức đặc thù cho các hệ thống kiểm soát chất lượng và phát hiện lỗi tự động [1]. Môi trường sản xuất hiện đại đòi hỏi các phương pháp kiểm tra có độ chính xác cao, có khả năng phát hiện những bất thường tinh vi trên bề mặt, bao gồm các vết nứt siêu nhỏ, vết mài, sai lệch kích thước và sự thay đổi độ nhám bề mặt – những yếu tố có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất và độ tin cậy của sản phẩm. Các phương pháp kiểm tra thủ công truyền thống vốn bị giới hạn bởi tính chủ quan của con người, hạn chế về tốc độ xử lý, và khả năng phát hiện không đồng nhất, đặc biệt khi kiểm tra các vật thể có hình dạng cong phức tạp dưới các điều kiện ánh sáng khác nhau.

Sự tích hợp công nghệ thị giác máy và học sâu đã tạo ra một cuộc cách mạng trong các hệ thống kiểm tra công nghiệp, mang lại các giải pháp kiểm soát chất lượng khách quan, có thể lặp lại và có năng suất cao [1]. Tuy nhiên, việc áp dụng các kỹ thuật thị giác máy tính truyền thống vào kiểm tra bề mặt cầu gặp phải những rào cản kỹ thuật đáng kể do các sai lệch từ biến dạng hình học vốn có trong các hệ thống ghi hình tiêu chuẩn. Khi các vật thể hình cầu được chụp bằng camera thông thường, hình ảnh thu được sẽ xuất hiện các biến dạng phức tạp, bao gồm biến dạng lồi, biến dạng lõm, và biến dạng phối cảnh, làm ảnh hưởng đến hiệu quả của các thuật toán phát hiện lỗi truyền thống [2].

Làm phẳng ảnh, hay còn gọi là hiệu chỉnh biến dạng hình học, là một kỹ thuật tiền xử lý cực kỳ quan trọng trong các ứng dụng thị giác máy tính liên quan đến bề mặt cong và các hình dạng không phẳng [3]. Phương pháp này bao gồm các phép biến đổi toán học phức tạp được thiết kế để khôi phục lại các mối quan hệ

hình học chính xác trong các ảnh bị biến dạng, từ đó cho phép đo lường và phân tích các đặc điểm bề mặt một cách chuẩn xác. Trong bối cảnh kiểm tra sản phẩm đúc dạng cầu, kỹ thuật làm phẳng ảnh có thể biến đổi hiệu quả các biểu diễn bề mặt cong thành một hệ tọa độ đã được chuẩn hóa, nơi các thuật toán phát hiện lỗi truyền thống có thể được áp dụng với độ chính xác và độ tin cậy cao hơn.

Các phát triển gần đây trong lĩnh vực tái tạo bề mặt 3D và kiểm tra chất lượng dựa trên đám mây điểm đã cho thấy những cải tiến vượt bậc trong việc phân tích bề mặt cong, với các hệ thống tiên tiến đạt được độ chính xác đo lường ở cấp độ micromet và độ nhạy phát hiện có khả năng xác định các lỗi nhỏ hơn 0.1mm [5]. Những tiến bộ công nghệ này nhấn mạnh tiềm năng của việc tích hợp các kỹ thuật xử lý ảnh phức tạp với hệ thống tự động hóa công nghiệp để đạt được mức độ chính xác chưa từng có trong kiểm soát chất lượng tại môi trường sản xuất.

Các phương pháp học bán giám sát đã cho thấy tiềm năng đặc biệt hứa hẹn trong các ứng dụng phát hiện lỗi bề mặt, nhất là khi làm việc với tập dữ liệu huấn luyện hạn chế – một kịch bản điển hình trong kiểm soát chất lượng công nghiệp [3]. Các phương pháp này có thể tận dụng hiệu quả cả dữ liệu đã gán nhãn và chưa gán nhãn để cải thiện độ chính xác phát hiện, đồng thời giảm sự phụ thuộc vào các quy trình gán nhãn thủ công tốn kém.

Nghiên cứu này trình bày một phương pháp luận mới để phát hiện lỗi trên sản phẩm đúc dạng cầu, kết hợp các kỹ thuật làm phẳng ảnh tiên tiến với các thuật toán phân tích được tăng cường bởi học máy, triển khai trên nền tảng thị giác máy tính OpenCV. Phương pháp này không chỉ giải quyết các thách thức cơ

bản trong việc hiệu chỉnh biến dạng hình học mà còn cung cấp một giải pháp thực tiễn, có thể triển khai, phù hợp cho các ứng dụng công nghiệp trong thực tế.

2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

Cấu trúc hệ thống và Thu nhận hình ảnh

Hệ thống phát hiện lỗi được đề xuất tích hợp một cấu trúc đa thành phần, được thiết kế để tối ưu hóa chất lượng hình ảnh và hiệu suất xử lý cho việc kiểm tra bề mặt cầu. Phân hệ thu nhận hình ảnh sử dụng môi trường chiếu sáng được kiểm soát, kết hợp các dãy đèn LED đồng bộ và ánh sáng khuếch tán để giảm thiểu sai ảnh do bóng đổ và phản xạ chói, những yếu tố có thể gây nhiễu cho quá trình phát hiện lỗi bề mặt [7]. Hệ thống chiếu sáng áp dụng kỹ thuật chiếu sáng phân cực để làm nổi bật cấu trúc bề mặt đồng thời giảm hiện tượng lóa/chói từ các bề mặt cầu bằng kim loại hoặc có độ phản xạ cao. Các bước tiến hành được thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Trình tự các bước xử lý

Hệ thống định vị camera duy trì mối quan hệ hình học nhất quán giữa cảm biến hình ảnh và vật thể cầu thông qua các đồ gá cơ khí chính xác và cơ cấu điều khiển định vị tự động. Cấu hình này đảm bảo các phép đo có tính lặp lại cao và các tham số hiệu chuẩn ổn định qua nhiều chu kỳ kiểm tra. Khả năng ghi hình đa phổ cho phép phát hiện các bất thường trên bề mặt mà có thể không nhìn thấy được dưới ánh sáng trắng thông thường, qua đó mở rộng dải các loại lỗi có thể được phát hiện. Kết quả thu ảnh được thể hiện ở hình 2.



Hình 2. Ảnh chụp từ mẫu bằng camera

Phân tích biến dạng hình học và mô hình hóa toán học

Nền tảng hiệu chỉnh biến dạng thấu kính

Nền tảng toán học cơ bản để hiệu chỉnh các biến dạng do camera gây ra bao gồm phép biến đổi tọa độ ảnh bị biến dạng (x_d, y_d) sang tọa độ đã được hiệu chỉnh (x_u, y_u) bằng cách sử dụng các mô hình biến dạng toàn diện [7]. Việc hiệu chỉnh biến dạng xuyên tâm tuân theo công thức khai triển đa thức sau:

$$x_u = x_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1x_dy_d + p_2(r^2 + 2x_d^2) \quad (1)$$

$$y_u = y_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y_d^2) + 2p_2x_dy_d \quad (2)$$

Trong đó $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ biểu diễn bình phương khoảng cách hướng tâm tính từ quang tâm.

Các hệ số biến dạng k_1, k_2, k_3 chịu trách nhiệm cho các hiệu ứng của biến dạng xuyên tâm, trong khi p_1, p_2 là các tham số của biến dạng tiếp tuyến. Các hệ số này được xác định thông qua quy trình hiệu chuẩn camera có hệ thống, bằng việc sử dụng các bảng hiệu chuẩn có độ chính xác cao với các đặc tính hình học đã biết trước [7].

Phép biến đổi phối cảnh cho bề mặt cong

Đối với các vật thể cầu trong phép chiếu phối cảnh, đòi hỏi phải có thêm các ma trận biến đổi để ánh xạ tọa độ của bề mặt cong sang các hệ quy chiếu đã được chuẩn hóa. Ma trận biến đổi homography $H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ cho phép chuyển đổi các tọa độ bị biến dạng do phối cảnh thành các biểu diễn được chuẩn hóa:

$$p' = H \cdot p \quad (3)$$

Trong đó, $p = (x, y, 1)^T$ là tọa độ đồng nhất của điểm ban đầu, và $p' = (x', y', w')^T$ là tọa độ sau khi biến đổi.

Xác định tâm và hiệu chuẩn bán kính của hình cầu

Việc xác định chính xác tâm của vật thể cầu là bước nền tảng cho quy trình làm phẳng ảnh. Hệ thống triển khai một phương pháp tiếp cận đa giai đoạn, kết hợp giữa thuật toán phát hiện cạnh tiên tiến, phép biến đổi Hough tròn, và các thuật toán khớp hình học [4]. Bộ phát hiện cạnh Canny với ngưỡng thích ứng được sử dụng để xác định các đường biên bề mặt nổi bật, đồng thời khử nhiễu và loại bỏ các thông tin cạnh không liên quan.

Phép biến đổi Hough cung cấp các ước tính ban đầu ổn định cho tọa độ tâm và tham số bán kính, ngay cả trong trường hợp vật thể bị che khuất một phần hoặc bề mặt có những điểm bất thường. Tiếp theo đó, các thuật toán khớp hình học sẽ tinh chỉnh những tham số này bằng phương pháp tối ưu hóa bình phương tối thiểu, nhằm đạt được độ chính xác ở mức dưới phần trăm trong việc xác định tâm. Kết quả được minh họa trong Hình 3.



Hình 3. Sau khi vị trí tâm tương đối được xác định, hình ảnh sẽ được khử méo. Ảnh đã được khử méo này cho phép việc đánh giá các vết nứt trên hình cầu trở nên thuận tiện hơn

Phép biến đổi làm phẳng và Ánh xạ bề mặt

Phép biến đổi làm phẳng ảnh cốt lõi sẽ chuyển đổi các biểu diễn của bề mặt cầu từ hệ tọa độ Descartes sang hệ tọa độ cực, với tâm đặt tại tâm hình cầu đã được xác định. Phép biến đổi này chiếu một cách hiệu quả bề mặt cong lên một hệ tọa độ phẳng, qua đó cho phép áp dụng các kỹ thuật xử lý ảnh 2D thông thường để phát hiện lỗi [4].

Phép biến đổi này ánh xạ mỗi tọa độ pixel (x, y) trong ảnh gốc sang tọa độ cực tương ứng (r, θ) trong biểu diễn đã được làm phẳng, trong đó r biểu thị khoảng cách xuyên tâm tính từ tâm hình cầu và θ biểu thị vị trí góc. Các thuật toán nội suy tiên tiến đảm bảo việc ánh xạ tọa độ diễn ra mượt mà, đồng thời bảo toàn các chi tiết cấu trúc bề mặt và giảm thiểu sai lệch răng cưa. Kết quả được minh họa trong Hình 4.





Hình 4. Kết quả ảnh sau khi khử méo với bán kính R .

Phát hiện lỗi được tăng cường bởi học máy

Tích hợp Mạng Nơ-ron Tích chập (CNN)

Hệ thống tích hợp các kiến trúc CNN được thiết kế chuyên biệt cho các ứng dụng phát hiện lỗi bề mặt [6]. Nền tảng CNN này xử lý các ảnh bề mặt đã được làm phẳng thông qua nhiều lớp tích chập với các bộ lọc đặc trưng đã được học, được tối ưu hóa để phát hiện nhiều loại lỗi khác nhau bao gồm vết nứt, vết xước, lỗ rỗ và sai lệch kích thước.

Kiến trúc mạng sử dụng các kết nối phân dư và cơ chế tập trung để cải thiện dòng chảy gradient và tập trung tài nguyên tính toán vào các vùng bề mặt liên quan. Các kỹ thuật tăng cường dữ liệu, bao gồm xoay ảnh, thay đổi tỷ lệ và điều chỉnh độ sáng, giúp nâng cao khả năng tổng quát hóa của mô hình khi làm việc với các tập dữ liệu huấn luyện hạn chế, một kịch bản điển hình trong các ứng dụng công nghiệp [3].

Phân tích vùng dựa trên ngưỡng thích ứng

Sau bước biến đổi làm phẳng, hệ thống áp dụng các kỹ thuật phân ngưỡng thích ứng được tăng cường bởi học máy để xác định các vùng quan tâm có khả năng chứa lỗi bề mặt [6]. Các giá trị ngưỡng được điều chỉnh một cách linh hoạt dựa trên các đặc tính thống kê cục bộ của ảnh, đặc tính phản xạ của bề mặt, và điều kiện chiếu sáng, nhằm thích ứng với sự thay đổi về thuộc tính vật liệu và môi trường chiếu sáng. Kết quả ảnh sau khi được phân ngưỡng được thể hiện ở Hình 5.



Hình 5. Kết quả ảnh sau khi phân ngưỡng

Cách tiếp cận đa ngưỡng này triển khai các mức độ nhạy khác nhau, được tối ưu hóa cho từng loại lỗi cụ thể:

- Phát hiện độ nhạy cao: Nhận diện những thay đổi tinh vi trên bề mặt và các lỗi siêu nhỏ.

- Phát hiện độ nhạy trung bình: Phát hiện các lỗi ở mức độ vừa phải, bao gồm vết xước và vết mài.

- Phát hiện độ nhạy thấp: Xác định các lỗi nghiêm trọng, chẳng hạn như vết nứt và các vết lõm sâu.

Trích xuất đặc trưng và Phân loại

Các thuật toán trích xuất đặc trưng tiên tiến sẽ tính toán một bộ tham số mô tả toàn diện cho mỗi vùng được phát hiện [6]. Bộ đặc trưng này bao gồm:

- Các đặc tính hình học: Diện tích, chu vi, tỷ lệ khung hình, độ tròn.

- Các đặc trưng dựa trên cường độ sáng: Cường độ trung bình, độ tương phản, độ lệch chuẩn.

- Các bộ mô tả cấu trúc bề mặt: Mẫu nhị phân cục bộ, Ma trận đồng xuất hiện mức xám.

- Các thuộc tính hình thái học: Độ lồi, độ đặc, độ bao phủ.

Các bộ phân loại học máy, bao gồm Máy vector hỗ trợ và Rừng ngẫu nhiên, sẽ xử

lý các vector đặc trưng này để xác định xác suất lỗi và thực hiện việc phân loại. Phương pháp tổ hợp này kết hợp đầu ra của nhiều bộ phân loại để cải thiện độ chính xác phát hiện tổng thể và giảm tỷ lệ dương tính giả.

3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Thiết lập thí nghiệm và hiệu chuẩn hệ thống

Quá trình kiểm chứng thực nghiệm được tiến hành trong một môi trường phòng thí nghiệm được kiểm soát, sử dụng các vật mẫu thử nghiệm hình cầu đã được chuẩn hóa chứa các lỗi nhân tạo có kích thước và đặc tính đã biết trước. Hệ thống ghi hình bao gồm một camera công nghiệp độ phân giải cao (cảm biến CMOS 5-megapixel) được trang bị hệ thống quang học chính xác, các dây đèn LED chiếu sáng đồng bộ, và thiết bị định vị được điều khiển bằng máy tính, nhằm đảm bảo các điều kiện đo lường có tính lặp lại cao.

Quy trình hiệu chuẩn camera sử dụng các bảng hiệu chuẩn dạng bàn cờ có độ chính xác cao, tuân thủ theo các quy trình chuẩn đã được công nhận [7]. Quá trình hiệu chuẩn đã đạt được độ chính xác ở mức dưới pixel với lỗi chiếu lại trung bình dưới 0.25 pixel, đảm bảo các tham số hiệu chỉnh biến dạng hình học là đáng tin cậy cho các giai đoạn xử lý tiếp theo. Kết quả phát hiện từ kỹ thuật cửa sổ trượt đa ngưỡng có chọn lọc được minh họa trong Hình 6.

Đánh giá hiệu năng làm phẳng ảnh

Phân tích định lượng về hiệu quả của phép biến đổi làm phẳng ảnh đã cho thấy những cải thiện đáng kể trong việc hiệu chỉnh độ chính xác hình học. Kết quả so sánh giữa ảnh gốc bị

biến dạng và ảnh đã được xử lý làm phẳng cho thấy mức độ giảm thiểu biến dạng xuyên tâm vượt 94% và hiệu chỉnh biến dạng tiếp tuyến đạt mức cải thiện 92% so với ảnh chưa được hiệu chỉnh.

Việc tối ưu hóa tốc độ xử lý, nhờ tận dụng cơ chế triển khai hiệu quả của OpenCV, đã đạt được hiệu năng thời gian thực với tốc độ khung hình phù hợp cho các ứng dụng công nghiệp. Toàn bộ quy trình biến đổi làm phẳng, bao gồm cả việc xác định tâm và ánh xạ tọa độ, cần khoảng 50-65 mili giây cho mỗi ảnh có kích thước 2048×2048 pixel, qua đó cho phép tốc độ kiểm tra tương thích với các yêu cầu của dây chuyền sản xuất năng suất cao.



Hình 6. Kết quả phát hiện từ kỹ thuật cửa sổ trượt đa ngưỡng có chọn lọc.

Phân tích Độ chính xác phát hiện lỗi

Quá trình kiểm nghiệm toàn diện sử dụng các vật mẫu lỗi đã được chuẩn hóa đã chứng minh hiệu năng phát hiện ổn định trên nhiều loại lỗi khác nhau [1]. Hệ thống được tăng cường bởi học máy đã đạt độ chính xác phát hiện tổng thể là 98.2% đối với vết nứt, 97.8% đối với vết mài, và 99.1% đối với các lỗi lõm.

Tỷ lệ lỗi được duy trì ở mức dưới 3.2% cho tất cả các loại lỗi, thể hiện mức cải thiện 72% so với các phương pháp kiểm tra thông thường không có bước tiền xử lý làm phẳng ảnh.

Phân tích thống kê về tính lặp lại của phép đo cho thấy độ nhất quán xuất sắc, với giá trị hệ số biến thiên dưới 2.8% cho các phép đo kích thước và dưới 4.2% cho các đặc tính

lỗi dựa trên cường độ sáng [6]. Mức độ chính xác này đáp ứng được các yêu cầu khắt khe của các ứng dụng kiểm soát chất lượng công nghiệp trong môi trường sản xuất có độ chính xác cao.

Phân tích Hiệu năng so sánh

Việc so sánh hiệu năng với các phương pháp kiểm tra thay thế, bao gồm ghi hình 2D trực tiếp, hệ thống thị giác lập thể, và các kỹ thuật đo lường dựa trên laser, đã chứng minh hiệu quả vượt trội của phương pháp dựa trên làm phẳng ảnh [1]. Phương pháp được đề xuất đã đạt độ chính xác phát hiện cao hơn từ 12-18%, đồng thời vẫn duy trì được hiệu suất tính toán phù hợp cho các ứng dụng công nghiệp thời gian thực.

Quá trình kiểm thử tích hợp với các hệ thống tự động hóa công nghiệp tiêu chuẩn, bao gồm bộ điều khiển logic khả trình và hệ thống điều hành sản xuất, đã xác nhận khả năng tương thích liền mạch [8]. Kiến trúc phần mềm dạng module cho phép tích hợp một cách dễ dàng vào các môi trường sản xuất đa dạng với yêu cầu tùy chỉnh ở mức tối thiểu.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các kết quả thực nghiệm đã xác nhận tính hiệu quả của các kỹ thuật làm phẳng ảnh được tăng cường bởi học máy cho các ứng dụng phát hiện lỗi trên sản phẩm đúc dạng cầu. Nền tảng toán học đã giải quyết thành công những thách thức cơ bản trong việc hiệu chỉnh biến dạng hình học, cho phép phân tích bề mặt một cách chính xác bất chấp các hình dạng cong phức tạp vốn có của vật thể cầu [2].

Việc triển khai dựa trên OpenCV cung cấp một giải pháp ổn định và hiệu quả, phù hợp để triển khai trong môi trường công nghiệp.

Các thuật toán được tối ưu hóa của thư viện này đảm bảo khả năng xử lý thời gian thực, đồng thời vẫn duy trì được mức độ chính xác cần thiết cho các ứng dụng kiểm soát chất lượng [4]. Kiến trúc dạng module giúp việc tùy chỉnh cho các yêu cầu ứng dụng cụ thể trở nên dễ dàng và hỗ trợ các cải tiến trong tương lai khi các thuật toán phát hiện ngày càng tiên bộ.

Nghiên cứu này chỉ ra một số hướng cải tiến và phát triển trong tương lai. Các phương pháp học sâu cho thấy tiềm năng đáng kể trong việc cải thiện độ chính xác phân loại lỗi và giảm sự phụ thuộc vào các tham số được tinh chỉnh thủ công [3]. Các kỹ thuật học bán giám sát tiên tiến có thể nâng cao hơn nữa hiệu năng của hệ thống khi làm việc với dữ liệu huấn luyện đã gán nhãn bị hạn chế, một kịch bản điển hình trong các ứng dụng sản xuất chuyên dụng.

Khả năng tái tạo bề mặt ba chiều (3D) có thể được tích hợp để cung cấp khả năng phân tích hình học nâng cao; điều này đặc biệt có giá trị đối với các hình thái lỗi phức tạp đòi hỏi phải có sự đặc tả về mặt thể tích [5]. Các phương pháp phân tích dựa trên đám mây điểm mang lại tiềm năng cho việc đánh giá chất lượng bề mặt một cách toàn diện hơn, vượt ra ngoài các phương pháp xử lý ảnh 2D truyền thống.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày một giải pháp toàn diện để phát hiện lỗi trên sản phẩm đúc dạng cầu, bằng cách sử dụng các kỹ thuật làm phẳng ảnh tiên tiến. Phương pháp luận đã giải quyết thành công những thách thức cơ bản trong việc hiệu chỉnh biến dạng hình học đối với việc kiểm tra bề mặt cầu, đạt được những cải thiện đáng kể về độ chính xác và độ tin cậy trong việc phát hiện lỗi so với các cách tiếp cận thông thường [1].

Nền tảng toán học, với sự kết hợp của việc hiệu chỉnh biến dạng xuyên tâm và tiếp tuyến, phép biến đổi phối cảnh, và các thuật toán được tăng cường bởi học máy, đã cung cấp một cơ sở vững chắc cho các ứng dụng kiểm soát chất lượng công nghiệp [2].

Kết quả kiểm chứng thực nghiệm cho thấy các đặc tính hiệu năng vượt trội, bao gồm độ chính xác phát hiện vượt 98% đối với các loại lỗi chính và tỷ lệ dương tính giả dưới 3.2% [6]. Hiệu suất xử lý của hệ thống cho phép tốc độ kiểm tra phù hợp với các môi trường sản xuất số lượng lớn, trong khi vẫn duy trì được độ chính xác cần thiết cho các ứng dụng đòi hỏi chất lượng nghiêm ngặt.

Nghiên cứu này đóng góp vào sự tiến bộ của công nghệ kiểm tra tự động đối với các bề mặt có hình dạng phức tạp và cung cấp một nền tảng thực tiễn để triển khai các giải pháp thị giác máy tính trong môi trường sản xuất công nghiệp [8]. Các hướng phát triển trong tương lai, kết hợp các kỹ thuật học sâu tiên tiến và khả năng phân tích ba chiều, có thể nâng cao hơn nữa hiệu năng của hệ thống và mở rộng tính linh hoạt trong ứng dụng [3, 5].

Sự tích hợp thành công giữa mô hình hóa toán học, thuật toán học máy, và các yêu cầu của tự động hóa công nghiệp đã chứng minh tiềm năng của các kỹ thuật xử lý ảnh tiên tiến trong việc chuyển đổi các phương pháp kiểm soát chất lượng truyền thống, mở ra một kỷ nguyên mới về độ chính xác và hiệu quả chưa từng có trong các quy trình kiểm tra sản xuất. ❖

Ngày nhận bài: 16/6/2025

Ngày phản biện: 02/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Kumar, A. (2022), "State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision". International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9(2), 661-691.
- [2]. Patterson, E. A., & Whelan, M. P. (1991), "A distortion-correction scheme for industrial machine-vision applications". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 38(3), 162-166.
- [3]. Wang, J., et al. (2024), "Semi-supervised auxiliary learning for surface defect detection and segmentation of injection-molded products from small image datasets". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 131(9-10), 4507-4522.
- [4]. Li, X., et al. (2021), "Image-Based Surface Defect Detection Using Deep Learning: A Review". Journal of Computing and Information Science in Engineering, 21(4), 040801.
- [5]. Huo, L., Liu, Y., Yang, Y., Zhuang, Z., & Sun, M. (2023), "Research on product surface quality inspection technology based on 3D point cloud". Advances in Mechanical Engineering, 15(3).
- [6]. Patel, K. K., Kar, A., Jha, S. N., & Khan, M. A. (2022), "Automated surface defect detection framework using machine vision and convolutional neural networks". Journal of Intelligent Manufacturing, 33(6), 1631-1661.
- [7]. Zhang, H., Wong, K. K., & Zhang, G. (2013), "A Planar-Dimensions Machine Vision Measurement Method Based on Lens Distortion Correction". Sensors, 13(11), 15542-15560.
- [8]. Wang, G., Tao, B., Liang, Z., Zhao, H., Guo, L., & Xie, L. (2022), "Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: A systematic review". Journal of Intelligent Manufacturing, 34(6), 2335-2387.

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ, CHẾ THỬ LIỀU PHÓNG ĐỘNG CƠ HÀNH TRÌNH NHIÊN LIỆU RẮN CHO TÊN LỬA CHỐNG TĂNG

RESEARCH, DESIGN, AND PROTOTYPE DEVELOPMENT OF THE LAUNCH CHARGE FOR THE CRUISE ENGINE OF A NEW-GENERATION ANTI-TANK MISSILE

TS. Bùi Văn Phương^{1,*}, TS. Mai Văn Tú¹, TS. Phạm Quang Hiếu², NCS. Bùi Anh Thúc²

¹Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

²Viện Thuốc phóng thuốc nổ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

*Email: phuongbv1991@gmail.com

TÓM TẮT

Nghiên cứu, tính toán thiết kế liều phóng là một trong các nhiệm vụ quan trọng của quá trình tính toán thiết kế chế tạo động cơ hành trình tên lửa chống tăng. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế, chế thử liều phóng động cơ hành trình ứng dụng cho tên lửa chống tăng thế hệ mới. Đây là loại động cơ nhiên liệu rắn, làm việc với hai chế độ tăng tốc và hành trình với thời gian làm việc dài (khoảng 20 giây). Kết quả nghiên cứu, tính toán lý thuyết và đo đạc thực nghiệm áp suất, lực đẩy của động cơ có sai số không quá 10 %, điều này chứng minh các tính toán, thiết kế, chế thử liều phóng cho động cơ hành trình tên lửa chống tăng thế hệ mới đạt các yêu cầu đề ra.

Từ khóa: Động cơ hành trình; Nhiên liệu rắn; Nhiệt động lực học; Lực đẩy động cơ; Tên lửa chống tăng.

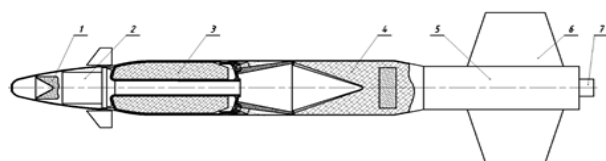
ABSTRACT

The research and design of the propulsion charge is one of the critical tasks in the design and development process of cruise engines for anti-tank missiles. This paper presents the results of the design and prototyping of a propulsion charge for a cruise engine intended for a new-generation anti-tank missile. The engine is a solid-propellant type, operating in two distinct modes – boost and cruise – with an extended operating time of approximately 20 seconds. Theoretical calculations and experimental measurements of pressure and thrust showed discrepancies of no more than 10%, demonstrating that the design, calculation, and prototyping of the propulsion charge for the cruise engine meet the specified performance requirements.

Keywords: Cruise engines; Solid propellant; Thermodynamics; Engine thrust anti-tank missile.

1. MỞ ĐẦU

Các loại tên lửa chống tăng có điều khiển (9M14M, 9M113, 9M119M, 9M133, Spike,...) thường sử dụng động cơ hành trình nhiên liệu rắn với thời gian làm việc dài, đây là bộ phận tạo ra lực đẩy để duy trì quá trình bay hành trình của tên lửa trên quỹ đạo [1-3]. Theo sự phát triển của khoa học công nghệ, đến nay nhiều loại tên lửa chống tăng thế hệ mới (9M119M, 9M133, Spike,...) được thiết kế với sơ đồ phối trí khác biệt, đó là động cơ hành trình đặt ở giữa vị trí đầu nổ chính và vị trí đầu nổ phụ, thiết kế này nhằm nâng cao uy lực xuyên lõm của đầu nổ chính (hình 1) [4]. Tuy nhiên, thiết kế khác biệt này kéo theo sự khác biệt về thiết kế của động cơ hành trình, đó là động cơ có một ống rỗng dọc trục để dòng xuyên lõm của đầu nổ chính đi qua.



Hình 1. Phối trí tên lửa chống tăng kiểu 9M133:
1 - Đầu nổ phụ; 2 - Khoang lái; 3 - Động cơ hành trình; 4 - Đầu nổ chính; 5 - Động cơ phóng; 6 - Cụm cánh ổn định; 7 - Cụm quang điện tử.

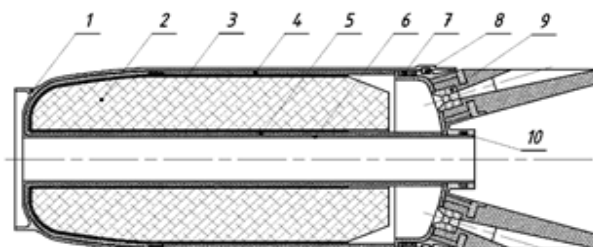
Trong nước, việc nghiên cứu phát triển loại động cơ hành trình có ống rỗng dọc trục còn mới mẻ và đối mặt với nhiều thách thức công nghệ. Nghiên cứu này nhằm xây dựng cơ sở tính toán và chế thử nhiên liệu phù hợp với loại động cơ hành trình có ống rỗng dọc trục cho tên lửa chống tăng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết kế sơ bộ động cơ hành trình

Động cơ hành trình sử dụng nhiên liệu

rắn trong nghiên cứu này có nguyên lý cấu tạo như trên hình 2. Động cơ được thiết kế là động cơ tên lửa nhiên liệu rắn một buồng đốt, hai chế độ cháy (tăng tốc và hành trình) cho tên lửa chống tăng thế hệ mới [5, 6].



Hình 2. Cấu tạo động cơ hành trình sử dụng nhiên liệu rắn cho tên lửa chống tăng:

1 - Vỏ động cơ; 2 - Thuốc phóng; 3 - Lớp chống cháy; 4, 5 - Lớp bảo vệ nhiệt; 6 - Ống dọc trục; 7, 10 - Gioăng bịt kín; 8 - Then; 9 - Khối loa phụt.

Các nghiên cứu tính toán thiết kế sơ bộ của tác giả trong [7] đã xác định được yêu cầu cơ bản đối với động cơ hành trình trong bảng 1.

Bảng 1. Các yêu cầu cơ bản đối với động cơ hành trình

TT	Tham số	Chế độ tăng tốc	Chế độ hành trình
1	Áp suất (p), MPa	11-12,5	4,5-5,5
2	Lực đẩy trung bình (P), N	800-830	300-320
3	Thời gian (t), s	> 1,5	> 18,0

2.2. Cơ sở lý thuyết

Tính toán các tham số nhiệt động học của động cơ: Các tham số nhiệt động học chính của động cơ hành trình bao gồm áp suất và lực đẩy theo thời gian $p = p(\tau)$; $P = P(\tau)$ được tính toán thông qua hệ phương trình thuật phóng trong [8]. Trong đó, W là thể tích tự do trong buồng đốt, $[m^3]$; S là diện tích bề mặt cháy liều phóng $[m^2]$; p_m là áp suất môi cháy thuốc

phóng, [Pa]; T là nhiệt độ trong buồng đốt [K]; R là hằng số khí của sản phẩm cháy, [J/kg.K]; χ là hệ số tổn thất nhiệt; T_v là nhiệt độ cháy đẳng tích, [K]; T_m là nhiệt độ buồng cháy nhiên liệu, [K]; k là chỉ số đoạn nhiệt của thuốc phóng; φ_2 là hệ số tổn thất qua loa phụt động cơ; A_k là hằng số; F_{th} là diện tích tiết diện tới hạn loa phụt [m²].

$$\begin{cases} \frac{dW_{td}}{d\tau} = Su; \\ \frac{de}{d\tau} = u = u_l p^v; \\ \dot{m} = \frac{\varphi_2 A_k F_{th} p}{\sqrt{RT}}; \\ \frac{dT}{d\tau} = \frac{T}{W_{td} p} [S \rho_T u R (\chi T_v - T) - (k-1) \dot{m} R T]; \\ \frac{dp}{d\tau} = \frac{1}{W_{td}} (S \rho_T u R \chi T_v - k \dot{m} R T - S p u). \end{cases} \quad (1)$$

Với các điều kiện đầu khi $t = 0$: $W_{td} = W_{td0}$; $e = e_0$; $m = m_0$; $T = T_m$; $p = p_{0m}$.

Các tổn thất nhiệt coi như không đổi và được lấy trung bình cho toàn bộ quá trình làm

việc theo phương trình:

$$\frac{dQ}{d\tau} = S u \rho_T c_v T_v (1 - \chi) = const.$$

Với các điều kiện khi $t = t_1$: $W_{td} = W_{max}$; $e = e_0$; $m = m_0$; $T = T_m$; $p = p_{k1}$.

Lực đẩy của động cơ được tính theo công thức: $P = C_p \cdot p \cdot F_{th} \cdot \cos(\alpha)$

Trong đó: P là lực đẩy động cơ [N]; C_p là hệ số lực đẩy; α là góc nghiêng của loa phụt so với trục dọc động cơ [rad].

Các hệ phương trình vi phân (1) và (2) có thể giải được khi có đầy đủ điều kiện đầu và các tham số đầu vào.

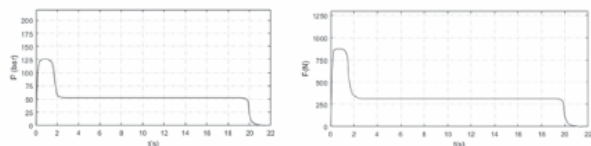
2.3. Kết quả tính toán

Các số liệu đầu vào của động cơ hành trình được sử dụng trong tính toán nhiệt động học được thống kê trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số đầu vào để tính toán động cơ hành trình

TT	Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Đường kính trong của buồng đốt	D_k	mm	125
2	Thể tích tự do ban đầu	W_0	m ³	0,000342
3	Khối lượng thuốc phóng	m_{TP}	kg	3,64
4	Chiều dài thời thuốc	L_{TP}	mm	236
5	Đường kính ngoài cùng thời thuốc	D_n	mm	120
6	Đường kính lỗ của thời thuốc	d_t	mm	42
7	Đường kính tới hạn 1 loa phụt	d_{th}	mm	4,6
8	Đường kính cửa ra 1 loa phụt	d_a	mm	9,3
9	Góc nghiêng của mỗi loa phụt	α	độ	18
10	Chỉ số mũ đoạn nhiệt của khí thuốc	k	-	1,26
11	Hằng số khí	R	kJ/kg.K	374,91
12	Nhiệt độ đẳng áp của sản phẩm cháy	T_p	K	1960
13	Mật độ thuốc phóng	ρ_T	kg/m ³	1610
14	Hệ số tốc độ cháy	u_l	m/s	$1,152 \cdot 10^{-4}$
15	Chỉ số mũ trong quy luật tốc độ cháy	v	-	0,283

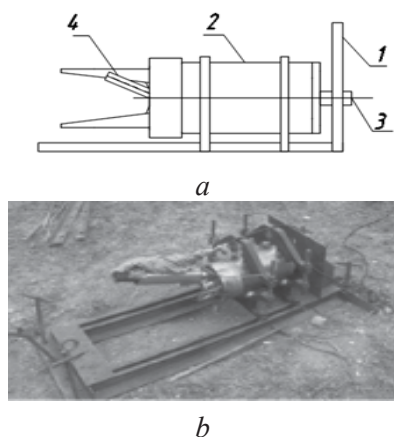
Hệ phương trình vi phân đại số (1), (2) được giải bằng phương pháp Runge-Kutta trên phần mềm tính toán Matlab. Kết quả tính toán các tham số áp suất, lực đẩy của động cơ hành trình theo thời gian được thể hiện trên hình 3.



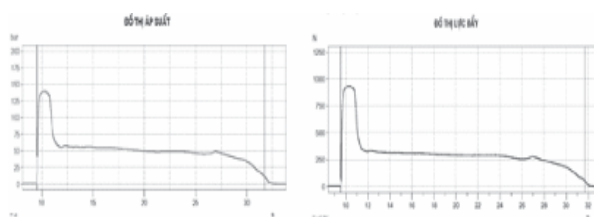
Hình 3. Đồ thị áp suất và lực đẩy theo thời gian của động cơ hành trình

2.4. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và thảo luận

Nghiên cứu chế thử, thử nghiệm liệu phóng động cơ hành trình tên lửa chống tăng được tác giả thực hiện trong [6]. Động cơ hành trình mẫu 2 được gá trên giá thử 1 tại trường thử như trên hình 4. Đầu đo lực 3 được lắp trên giá thử tại vị trí chính giữa phía trước động cơ, đầu đo công suất 4 được lắp trên nắp loa phụt. Đồ thị áp suất, lực đẩy theo thời gian của động cơ hành trình mẫu trong quá trình thử nghiệm được thể hiện trên hình 5.



Hình 4. Thử nghiệm động cơ hành trình mẫu trên trường thử: a - Sơ đồ nguyên lý; b - Thực tế thử nghiệm. 1 - Giá thử; 2 - Động cơ hành trình mẫu; 3 - Đầu đo lực; 4 - Đầu đo áp suất.



Hình 5. Đồ thị thực nghiệm đo áp suất, lực đẩy của động cơ hành trình mẫu

Một số giá trị các tham số nhiệt động học của động cơ hành trình theo tính toán lý thuyết và đo đạc thực nghiệm trên động cơ hành trình mẫu được tổng hợp trong bảng 3.

Từ các đồ thị áp suất và lực đẩy theo thời gian của động cơ hành trình theo tính toán và đo đạc thực nghiệm trên động cơ mẫu có thể đưa ra một số nhận xét sau:

- Hình dạng các đồ thị áp suất, lực đẩy theo thời gian theo thời gian của động cơ hành trình theo tính toán và thực nghiệm là tương đồng (đồng dạng), các đồ thị thể hiện rõ động cơ làm việc hai chế độ tăng tốc và hành trình. Động cơ hành trình mẫu làm việc ổn định với thời gian dài (lớn hơn 20 giây), với lực đẩy trung bình trong giai đoạn tăng tốc lớn hơn 810 N, lực đẩy trung bình trong giai đoạn hành trình lớn hơn 275 N.

- Từ các giá trị trong bảng 2 cho thấy, sai số giữa kết quả tính toán lý thuyết và kết quả đo đạc thực nghiệm của một số đặc trưng nhiệt động học của động cơ hành trình không quá 10%, sai số này nằm trong giới hạn cho phép trong tính toán động cơ tên lửa nhiên liệu rắn [9].



Bảng 3. Một số giá trị các tham số nhiệt động học của động cơ hành trình theo tính toán và đo đạc thực nghiệm trên động cơ mẫu

TT	Tham số (đơn vị tính)	Kết quả tính toán lý thuyết	Kết quả đo thực nghiệm	Sai số (%)
I	Giai đoạn tăng tốc			
1	Áp suất lớn nhất (bar)	125,6	139,2	9,77
2	Áp suất trung bình (bar)	116,7	121,6	4,03
3	Lực đẩy lớn nhất (N)	872,5	934,3	6,61
4	Lực đẩy trung bình (N)	778,2	810,2	3,95
5	Thời gian làm việc (giây)	1,65	1,69	2,37
6	Tổng xung lực đẩy (N.s)	1245,1	1318,7	5,58
II	Giai đoạn hành trình			
1	Áp suất lớn nhất (bar)	63,2	66,9	5,53
2	Áp suất trung bình (bar)	48,6	48,1	1,04
3	Lực đẩy lớn nhất (N)	404,8	410,7	1,44
4	Lực đẩy trung bình (N)	290,8	277,2	4,91
5	Thời gian làm việc (giây)	18,85	20,50	8,05
6	Tổng xung lực đẩy (N.s)	5727,9	5557,9	3,06

Kết quả tính toán trên đây là cơ sở quan trọng để thiết kế, chế thử, thử nghiệm động cơ hành trình. Kết quả này minh chứng về khả năng làm chủ thiết kế và khả năng làm chủ một số công nghệ chính trong chế tạo liều phóng cho động cơ hành trình tên lửa chống tăng thế hệ mới tại Việt Nam như: công nghệ bọc chống cháy bề mặt lỗ của thời thuốc phóng ballistic; công nghệ chế tạo khối tới hạn loa phụt và lớp bảo vệ nhiệt động cơ hành trình nhiên liệu rắn làm việc với thời gian dài,...

3. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này chứng minh hiệu quả của việc thiết kế, chế thử và thử nghiệm liều phóng cho động cơ hành trình sử dụng nhiên liệu rắn cho tên lửa chống tăng thế hệ mới. Mẫu động cơ hành trình cho tên lửa chống tăng với cấu trúc có ống rỗng dọc trục được tác giả thiết kế, chế thử và thử nghiệm lần đầu tiên tại Việt Nam. Đối chiếu với tính toán lý thuyết, số liệu

thử nghiệm cho thấy liều phóng của động cơ hành trình đã đạt được một số kết quả đáng chú ý, bao gồm:

- Đảm bảo cho động cơ hành trình làm việc với hai chế độ tăng tốc và hành trình theo yêu cầu thiết kế. Các tham số lực đẩy và thời gian trong giai đoạn tăng tốc và hành trình phù hợp với các yêu cầu thiết kế đặt ra. Kết quả thực nghiệm đã chứng minh phương án thiết kế và công nghệ chế thử liều phóng động cơ hành trình có ống rỗng dọc trục là đúng đắn;

- Sai số giữa kết quả tính toán lý thuyết và kết quả đo đạc thực nghiệm của một số đặc trưng nhiệt động học của động cơ hành trình này nằm trong giới hạn cho phép trong tính toán động cơ tên lửa nhiên liệu rắn.

Kết quả nghiên cứu đã đạt được có thể ứng dụng trong thiết kế, chế tạo động cơ hành trình cho tên lửa chống tăng thế hệ mới (kiểu

9M133, 9M113,...) và làm động cơ hành trình cho một số loại tên lửa hoặc thiết bị bay có điều khiển tầm ngắn. Đây là cơ sở để tác giả thực hiện các nghiên cứu tiếp theo để tối ưu hóa các tham số thiết kế như kích thước, khối lượng,... của động cơ hành trình đáp ứng các yêu cầu đặt ra. ❖

Ngày nhận bài: **15/7/2025**

Ngày phản biện: **04/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Phan Nguyên Thiệu, Khổng Đình Tuy, Nguyễn Trường Sinh, Trương Tư Hiếu (1998), “*Trang bị điển hình vũ khí tổng hợp – Phần III: Trang bị điển hình tên lửa chống tăng có điều khiển và tên lửa phòng không mang vác*”. Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [2]. А.Б. Широкоград под общей редакцией А.Е. Тараса (2003), “*Энциклопедия Отечественного ракетного оружия*”. М.: АСТ, Мн.: Харвест.
- [3]. В. В. Ветров, М.В.Грязев, Д.А.Дехтяр, Л.Г.Захаров, А.В.Игнатов, А.С.Лыгин, А.Р.Орлов, И.В.Степаничев, под редакцией А.Г.Шипунова(2006), “*Основы устройства и функционирования противотанковых управляемых ракет*”. Тула: Изд-во ТулГУ, 182 с.
- [4]. T. Mohan Reddy, A. Subanandha Rao, M. Sambasiva Rao (2013), “*Design and Development of Propulsion System for Antitank Guided Missile*”. Defence Science Journal, Vol. 45(3), pp.213-219.
- [5]. FSVTS of Russia, “*Kornet-EM – Antitank Guided Missile System*” [Online]. Available: <https://www.fsvts.gov.ru/catalog/973.en.html>.
- [6]. Р.Д.Ангельский (2002), “*Отечественные противотанковые комплексы*”. М: ООО Издательство Астрель, 192с.
- [7]. Mai Văn Tú (2023), “*Nghiên cứu thiết kế, chế tạo động cơ hành trình kiểu mới ứng dụng cho tên lửa chống tăng điều khiển bán tự động*”. Đề tài khoa học, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Hà Nội.
- [8]. Lê Song Tùng, Nguyễn Công Hòe, Hoàng Thế Dũng, Bùi Đình Tân (2015), “*Cơ sở tính toán và thiết kế động cơ tên lửa nhiên liệu rắn*”. NXB. Quân đội, 2015.
- [9]. Phạm Thế Phiệt (1995), “*Lý thuyết động cơ tên lửa*”. Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH QUYẾT ĐỊNH ĐA TIÊU CHÍ TRONG LỰA CHỌN CÔNG NGHỆ TÁI CHẾ CHẤT THẢI ĐIỆN TỬ

APPLICATION OF MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING MODEL IN THE SELECTION OF E-WASTE RECYCLING TECHNOLOGIES

Thái Hoàng Tuyết Nhi¹, Nguyễn Văn Thành¹, Dương Công Châu^{2,*}

¹Bộ môn Logistics và Quản lý Chuỗi cung ứng, Trường Công nghệ Văn Lang,
Trường Đại học Văn Lang

²Khoa Thương mại, Trường Đại học Văn Lang

*Email: chau.2483401210002@vanlanguni.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh xã hội hóa và hiện đại hóa, rác thải nói chung và chất thải điện tử nói riêng đang trở thành mối đe dọa nghiêm trọng. Việt Nam cũng không ngoại lệ, khi lượng rác thải điện tử không ngừng gia tăng do nhu cầu sử dụng thiết bị công nghệ trong kỷ nguyên 5.0. Nhằm giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã ứng dụng mô hình tích hợp AHP và TOPSIS trong quyết định đa tiêu chí (MCDM) để đánh giá và lựa chọn công nghệ tái chế chất thải điện tử tối ưu. Qua việc đánh giá các công nghệ tái chế như cơ học, nhiệt, hóa học và sinh học được dựa trên các tiêu chí hiệu quả kinh tế, công nghệ, môi trường, xã hội kết quả công nghệ tái chế hóa học được đánh giá và xác định là hiệu quả nhất, đứng đầu bảng xếp hạng với chỉ số phương án tích cực C_b 0,736. Nghiên cứu này không chỉ cung cấp phương pháp tiếp cận khoa học và hệ thống trong việc ra quyết định, mà còn nâng cao hiệu quả tái chế, giảm tác động môi trường và đảm bảo an toàn lao động. Đồng thời, nó mở ra tiềm năng ứng dụng AHP và TOPSIS trong nhiều lĩnh vực khác, góp phần vào mục tiêu phát triển bền vững của Việt Nam.

Từ khóa: AHP; Chất thải điện tử; E-waste; MCDM; Môi trường; TOPSIS.

ABSTRACT

In the context of socialization and modernization, waste in general, and electronic waste (e-waste) in particular, have become serious threats. Vietnam is no exception, as the volume of e-waste continues to rise due to the increasing demand for technological devices in the era of Industry 5.0. To address this issue, researchers have applied an integrated AHP and TOPSIS model within the Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) framework to evaluate and select the optimal technology for e-waste recycling. By assessing various recycling technologies, including mechanical, thermal, chemical, and biological methods, based on criteria such as economic efficiency, technological feasibility, environmental impact, and social factors, chemical recycling has been identified as the most effective. It ranked first with a positive ideal solution index (C_b) of 0.736. This study not only provides a scientific and systematic approach to decision-making but also improves recycling efficiency, reduces environmental impact, and ensures occupational safety. Furthermore, it opens up opportunities to apply AHP and TOPSIS in many other fields, contributing to Vietnam's sustainable development goals.

Keywords: AHP; Electronic waste; E-waste; MCDM; Environment; TOPSIS.

1. GIỚI THIỆU

Sự gia tăng dân số trong thời kỳ công nghiệp hóa đã kéo theo lượng chất thải rắn, từ sinh hoạt đến công nghiệp, tăng vọt đáng kể. Đặc biệt, chất thải điện tử ngày càng chiếm tỷ trọng lớn, gây ra nhiều thách thức nghiêm trọng. Thực trạng này đòi hỏi các giải pháp quản lý bền vững và phương pháp xử lý hiệu quả hơn bao giờ hết để bảo vệ môi trường và sức khỏe con người.

Theo Ngân hàng Thế giới, mỗi năm thế giới tạo ra khoảng 2,01 tỷ tấn rác thải đô thị, trong đó 33% không được xử lý an toàn [1]. Năm 2019, thế giới đã sản sinh 53,6 triệu tấn rác thải điện tử, với lượng rác thải dự kiến sẽ đạt 74,7 triệu tấn vào năm 2030 [2]. Tại Việt Nam, tình hình chất thải đáng lo ngại với 24,5 triệu tấn chất thải sinh hoạt và 8,1 triệu tấn chất thải công nghiệp mỗi năm. Tỷ lệ thu gom tại đô thị chỉ đạt 70-85%, và ở nông thôn là 40-55%. Theo Viện Khoa học và Công nghệ Môi trường, Việt Nam tạo ra khoảng 100.000 tấn rác thải điện tử hàng năm, dự báo sẽ đạt 250.000 tấn vào năm 2025 [3]. Những con số này cho thấy sự nghiêm trọng của rác thải điện tử không chỉ gây ô nhiễm môi trường mà còn ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe, đặc biệt là với người lao động trong ngành tái chế ở các nước đang phát triển, dẫn đến nguy cơ mắc bệnh mãn tính và ung thư. Nghiên cứu này tập trung vào việc chọn lựa công nghệ tái chế phù hợp nhằm giảm thiểu tác động tiêu cực của rác thải điện tử. Theo P. Tanskanen, thiết bị điện và điện tử thải bỏ (WEEE) là một trong những loại chất thải phát triển nhanh nhất toàn cầu [4]. Việc tái chế hiệu quả không chỉ bảo vệ môi trường mà còn thu hồi vật liệu kinh tế có giá trị như H.-Y. Kang và J. M. Schoenung đã phân tích các xu hướng tái chế rác thải điện tử và các công nghệ tái chế hiện có đối với kính, nhựa, và kim loại [5].

Tại Việt Nam, phương pháp xử lý rác thải phổ biến là chôn lấp, phân loại, và đốt thủ công. Tuy nhiên, chỉ khoảng 120 trên hơn 660 bãi chôn lấp được coi là hợp vệ sinh, gây ra nhiều vấn đề về ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng kinh tế - xã hội [6]. Báo cáo từ Envilience ASIA [7] đã cung cấp số liệu về tình trạng này (Hình 1). Những thách thức và nguy cơ từ việc xử lý rác thải điện tử không chỉ là vấn đề riêng của Việt Nam mà còn là mối quan tâm lớn trên toàn cầu, đòi hỏi những hành động mạnh mẽ và kịp thời từ cả cộng đồng quốc tế và trong nước.

Dựa vào các vấn đề đã trình bày, trong nghiên cứu mô hình được đề xuất là mô hình quyết định đa tiêu chí MCDM kết hợp sử dụng với phương pháp AHP và kỹ thuật TOPSIS để xác định đánh giá và lựa chọn công nghệ tái chế chất thải điện tử tối ưu nhất. Kết quả nghiên cứu này không chỉ có ý nghĩa đối với Việt Nam mà còn đóng góp cho cộng đồng quốc tế trong việc quản lý và xử lý chất thải điện tử.

2. LƯỢC KHẢO TÀI LIỆU

Chất thải điện tử (E-waste) là một loại chất thải bao gồm nhiều loại có thể phân hủy hoặc không phân hủy, hoặc có thể tái sử dụng tận dụng nguồn tài nguyên có sẵn. Vấn đề xử lý chất thải điện tử này cũng được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng phương pháp MCDM hoặc kết hợp nhiều phương pháp kỹ thuật khác để nghiên cứu lựa chọn công nghệ tái chế chất thải rắn tối ưu nhất. Một nghiên cứu của Vaverková, M.D. [8] đã tìm ra được kết quả của việc xử lý chất thải rắn bằng bãi chôn lấp ngay cả khi đạt được mức độ tránh chất thải, tái sử dụng và tái chế cao, một số vật liệu thải vẫn luôn cần được chuyển tiếp để xử lý tránh ảnh hưởng đến môi trường. N. Van Thanh [9] sử dụng Fuzzy MCDM, FAHP và kỹ thuật Cocosmo cho chất thải rắn để tái tạo thành năng lượng tại Việt Nam. G. 

van de Kaa và cộng sự [10] đã áp dụng MCDM để lựa chọn công nghệ quang điện tối ưu. Kharat và cộng sự [11] sử dụng phương pháp FAHP kết hợp với TOPSIS để giúp nhà quản trị xác định được địa điểm chôn lấp hiệu quả trong quá trình ra quyết định lựa chọn địa điểm chôn lấp tại thành phố Mumbai. M. Aghajani Mir và cộng sự [12] thực hiện kỹ thuật TOPSIS kết hợp với kỹ thuật VIKOR trong phân tích quyết định đa tiêu chí MCDM để phát triển mô hình quản lý xử lý chất thải rắn đô thị được tối ưu hóa. M. Govind Kharat và cộng sự [13] đã áp dụng Fuzzy-MCDM cùng với kỹ thuật TOPSIS để lựa chọn công nghệ xử lý và tiêu hủy chất thải rắn đảm bảo về tiêu chí có ý thức môi trường. H. Asefi and S. Lim [14] tiến hành thực hiện phương pháp GIS, Delphi, TOPSIS and ε-ràng buộc để tìm ra giải pháp quản lý chất thải rắn đô thị tổng hợp. A. Coban và cộng sự [15] đã sử dụng phương pháp MCDM kết hợp với kỹ thuật TOPSIS, PROMETHEE I, PROMETHEE II thông qua 7 tiêu chí để đánh giá quản lý chất thải rắn đô thị. Kết quả thông qua 3 phương pháp xác định được công nghệ tái chế và chôn lấp là nổi bật nhất ở các nước đang phát triển. A. Soltani và cộng sự [16] ứng dụng MCDA và kỹ thuật AHP để giải quyết các vấn đề về quản lý chất thải rắn đô thị. B. Vučijak và cộng sự [17] ra quyết định đa tiêu chí về nghiên cứu lựa chọn phương án quản lý chất thải rắn tốt nhất ở thành phố Bosnia, Herzegovina. B. Milutinović và cộng sự [18] đã ứng dụng AHP trong phân tích đa tiêu chí để quản lý chất thải và thu hồi năng lượng với kết quả đạt được từ ủ phân hữu cơ và tái chế chất thải hữu cơ.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Phương pháp phân tích thứ bậc - Analytic Hierarchy Process Method (AHP)

AHP là một phương pháp ra quyết định

đa tiêu chí được phát triển vào cuối thập niên 1970. Phương pháp này giúp các nhà ra quyết định phân tích và lựa chọn phương án tối ưu khi có nhiều tiêu chí khác nhau được tìm ra bởi Thomas L. Saaty.

• Bước 1: Hình thành ma trận so sánh cặp

$$\widetilde{P} = \begin{bmatrix} \widetilde{P}_{11}^t & \widetilde{P}_{12}^t & \dots & \widetilde{P}_{1n}^t \\ \widetilde{P}_{21}^t & \widetilde{P}_{22}^t & \dots & \widetilde{P}_{2n}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \widetilde{P}_{n1}^t & \widetilde{P}_{n2}^t & \dots & \widetilde{P}_{nn}^t \end{bmatrix} \quad (1)$$

• Bước 2: Tính toán trọng số và giá trị riêng lớn nhất

$$|W - \lambda_{\max} \cdot U| = 0 \quad (2)$$

Trong đó:

- $\lambda_{\max}$: Giá trị riêng lớn nhất của ma trận;
- W: Ma trận so sánh cặp giữa các tiêu chí;
- U: Ma trận cùng cấp với ma trận W.

Bước 4: Tính vectơ nhất quán λ

$$\lambda_{\max} = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n P_{ij} \times w_j}{w_i} \right)}{n} \quad (3)$$

Trong đó:

- P_{ij} là phần tử của ma trận so sánh cặp;
- w_j là trọng số của tiêu chí j;
- w_i là trọng số của tiêu chí i;
- n là số lượng tiêu chí.

Bước 5: Kiểm tra lại ma trận, tính chỉ số nhất quán

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - a}{a - 1} \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

Trong đó:

- $\lambda_{\max}$ là giá trị riêng lớn nhất của ma trận;
- a là số tiêu chí;
- CR là tỷ lệ nhất quán;
- CI là chỉ số nhất quán;
- RI là chỉ số ngẫu nhiên.

Kết quả của $CR \leq 0.1$ thì đạt yêu cầu, ngược lại nếu $CR \geq 0.1$ thì ta phải tiến hành đánh giá từ đầu.

3.2. Phương pháp xếp hạng theo thứ tự ưu tiên dựa trên sự tương đồng với giải pháp lý tưởng TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TOPSIS là phương pháp dựa trên độ tương đồng với phương án lý tưởng tích cực và khoảng cách xa với phương án lý tưởng tiêu cực, được giới thiệu bởi Hwang, Yoon (1981). Phương pháp này giúp đơn giản hóa quá trình so sánh giữa nhiều tiêu chí phức tạp, đặc biệt khi cần cân nhắc giữa nhiều yếu tố đối lập, đồng thời đảm bảo tính khách quan. TOPSIS còn dễ dàng áp dụng và có thể sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, từ kinh doanh đến kỹ thuật.

Để thực hiện phương pháp TOPSIS, bao gồm 4 bước như sau:

• Bước 1: Hình thành ma trận đánh giá với a lựa chọn và b tiêu chí, ma trận $[R_{mn}]_{ab}$.

• Bước 2: Chuẩn hóa ma trận $[R_{mn}]_{ab}$ để tạo ra ma trận $Y = (a_{mn})_{ab}$

$$D_{mn} = \frac{R_{mn}}{\sqrt{\sum_{m=1}^a R_{mn}^2}}, m = 1, 2, \dots, a; n = 1, 2, \dots, b \quad (6)$$

Bước 3: Nhân ma trận với trọng số

$$c_{ab} = b_{ab} \cdot f_b, a = 1, 2, \dots, m; b = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Trong đó: $f_b = [0, 1]$ và $\sum_{b=1}^n f_b = 1$

• Bước 4: Xác định phương án tích cực và giải pháp lý tưởng tiêu cực

$$\begin{aligned} TIS^+ &= (c_1^+, c_2^+, \dots, c_n^+) \text{ với} \\ c_b^+ &= \{\langle \max(c_{ab} | a = 1, 2, \dots, m | b \in B'), \\ &\langle \min(c_{ab} | a = 1, 2, \dots, m | b \in B'') \rangle\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} VIS^- &= (c_1^-, c_2^-, \dots, c_n^-) \text{ với} \\ c_b^- &= \{\langle \min(c_{ab} | a = 1, 2, \dots, m | b \in B'), \\ &\langle \max(c_{ab} | a = 1, 2, \dots, m | b \in B'') \rangle\} \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó: B' là tiêu chí lợi ích và B'' là tiêu chí chi phí.

• Bước 5: Tính toán khoảng cách của mỗi lựa chọn so với TIS và VIS

$$c_b^+ = \sqrt{\sum_{b=1}^n (c_{ab} - c_b^+)^2}, a = 1, 2, \dots, n; b = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$c_b^- = \sqrt{\sum_{b=1}^n (c_{ab} - c_b^-)^2}, a = 1, 2, \dots, n; b = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

• Bước 6: Xếp hạng cuối cùng.

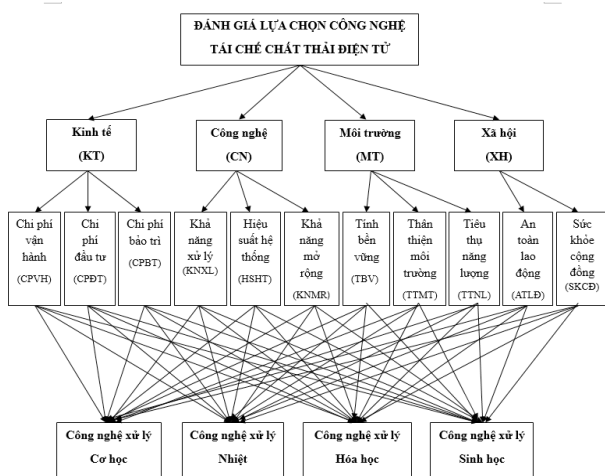
$$RANKING_a = \frac{c_b^-}{(c_b^- + c_b^+)} a = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

4. NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH

4.1. Triển khai Mô hình phân tích thứ bậc (AHP)

Sơ đồ phân cấp thứ bậc được trình bày như Hình 4.1.





Hình 4.1. Sơ đồ phân tích thứ bậc AHP

Để tính toán kết quả ưu tiên của các tiêu chí, trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp so sánh cặp các tiêu chí gồm có 4 tiêu chí chính và 11 tiêu chí phụ để đảm bảo việc lựa chọn công nghệ xử lý hiệu quả, tối ưu chất thải điện tử nhất và công thức mô hình phân tích thứ AHP từ (1) – (6), ta được kết quả trong Bảng 4.1.

Bảng 4.1. Kết quả trọng số ưu tiên của các tiêu chí bằng AHP

Tiêu chí	Trọng số ưu tiên	Thứ tự
Chi phí vận hành (CPVH)	0.23183	1
Chi phí đầu tư (CPĐT)	0.04544	7
Chi phí bảo trì (CPBT)	0.03739	8
Khả năng xử lý (KNXL)	0.09159	5
Hiệu suất hệ thống (HSHT)	0.14168	3
Khả năng mở rộng (KNMR)	0.01960	11
Tính bền vững (TBV)	0.12021	4
Thân thiện môi trường (TTMT)	0.19749	2
Tiêu thụ năng lượng (TTNL)	0.06261	6
An toàn lao động (ATLĐ)	0.02196	10
Sức khỏe cộng đồng (SKCĐ)	0.03021	9

Từ kết quả ở Bảng 4.1, dựa trên các trọng số ưu tiên sau khi áp dụng phương pháp AHP cho các tiêu chí đánh giá công nghệ xử lý tái chế chất thải điện tử, tiêu chí có trọng số cao nhất là chi phí vận hành với trọng số 0.23183. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc lựa chọn công nghệ có kinh tế - chi phí hợp lý để đảm bảo tính khả thi và hiệu quả kinh tế lâu dài. Tiêu chí thân thiện môi trường được xếp thứ hai cũng là một yếu tố quan trọng với trọng số 0.19749, phản ánh tình hình thực tế môi trường cần được bảo vệ bởi lẽ đây là một vấn đề nan giải khi xử lý các chất thải điện tử.

4.2. Phương pháp xếp hạng theo thứ tự ưu tiên dựa trên sự tương đồng với giải pháp lý tưởng (TOPSIS)

Bằng cách sử dụng trọng số ưu tiên và đánh giá từ các chuyên gia, ta áp dụng công thức từ (7) – (13) được kết quả xếp hạng các công nghệ tái chế hiện nay như Bảng 4.2:

Bảng 4.2. Kết quả xếp hạng các công nghệ tái chế

Công nghệ tái chế	Cb+	Cb-	Cb	Xếp hạng
Công nghệ xử lý cơ học	0.1277	0.0635	0.332	4
Công nghệ xử lý nhiệt	0.0564	0.1014	0.643	2
Công nghệ xử lý hóa học	0.0478	0.1333	0.736	1
Công nghệ xử lý sinh học	0.0702	0.1130	0.617	3

Dựa trên kết quả lựa chọn công nghệ xử lý tái chế chất thải điện tử bằng cách sử dụng mô hình TOPSIS và ta thấy được rằng, công nghệ xử lý hóa học đứng đầu bảng xếp hạng với chỉ số Cb là 0.736, cho thấy đây là công nghệ

tối ưu nhất theo đánh giá của mô hình trong bài nghiên cứu này. Điều này có nghĩa là xử lý hóa học có sự tương đồng cao nhất với giải pháp lý tưởng, đáp ứng tốt nhất các tiêu chí đã được xác định. Tiếp theo, công nghệ xử lý nhiệt xếp ở vị trí thứ hai với chỉ số Cb là 0.643, đây cũng được xem là một lựa chọn rất tốt và hiệu quả. Công nghệ xử lý sinh học đứng ở vị trí thứ ba với chỉ số Cb là 0.617, tuy không tối ưu như hai công nghệ trên nhưng vẫn là một phương án khả thi. Công nghệ xử lý cơ học xếp ở vị trí thứ tư với chỉ số Cb là 0.332, điều này cho thấy hiệu quả của công nghệ kém hơn so với các công nghệ khác.

5. THẢO LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã áp dụng mô hình tích hợp MCDM kết hợp AHP và TOPSIS để đánh giá và lựa chọn công nghệ tái chế chất thải điện tử. Kết quả cho thấy công nghệ xử lý hóa học là lựa chọn tối ưu, phù hợp với điều kiện thị trường Việt Nam hiện nay. Các công nghệ sinh học, nhiệt và cơ học tuy được xem xét nhưng kém phù hợp hơn. Mô hình cho thấy hiệu quả trong việc phân tích và xếp hạng các công nghệ dựa trên các tiêu chí kinh tế, môi trường và xã hội. Đề tài đóng góp thiết thực cho quá trình ra quyết định trong quản lý rác thải điện tử và mở ra tiềm năng ứng dụng mô hình AHP-TOPSIS trong các lĩnh vực khác.

Mặc dù đề tài đã đạt được những kết quả đáng ghi nhận trong việc đánh giá và lựa chọn công nghệ tái chế chất thải điện tử, nhưng vẫn còn một số hạn chế cần lưu ý. Phạm vi nghiên cứu còn hẹp, chủ yếu tập trung vào công nghệ mà chưa bao quát đầy đủ các khía cạnh khác của quản lý chất thải điện tử như thu gom, vận chuyển, xử lý sau tái chế, sự chấp nhận của cộng đồng và yếu tố xã hội. Dữ liệu sử dụng chủ yếu từ chuyên gia, thiếu dữ liệu thực tiễn từ các

nhà máy hoặc dự án thử nghiệm. Bên cạnh đó, chi phí chuyển đổi công nghệ và bối cảnh triển khai cụ thể tại Việt Nam chưa được phân tích sâu. Các yếu tố pháp lý, chính sách hỗ trợ cũng chưa được đề cập rõ. Ngoài ra, do công nghệ tái chế phát triển nhanh, các kết luận của nghiên cứu có thể nhanh chóng lạc hậu nếu không cập nhật thường xuyên. Những điểm này nên được bổ sung trong các nghiên cứu tiếp theo để nâng cao tính thực tiễn và hiệu quả của giải pháp đề xuất. ❖

Ngày nhận bài: 23/6/2025

Ngày phản biện: 08/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. J. Ruan and Z. Xu, “Constructing environment-friendly return road of metals from e-waste: Combination of Physical Separation Technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 745-760, Feb. 2016. doi:10.1016/j.rser.2015.10.114.
- [2]. V. Forti, C.P. Balde, R. Kuehr, G. Bel, “The Global E-Waste Monitor 2020: Quantities, Flows and the Circular Economy Potential”. United Nations University/United Nations Institute for Training and Research, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association, Bonn, Germany; Geneva, Switzerland; Rotterdam, The Netherlands, 2020.
- [3]. “Tác hại của rác thải điện tử đến môi trường”. <https://dangcongsan.vn>, [https://dangcongsan.vn/xay-dung-xa-hoi-an-toan-truoc-thien-tai/tac-hai-cua-rac-thai-dien-tu-den-moi-truong-661711.html](https://dangcongsan.vn/xay-dung-xa-hoi-an-toan-truoc-thien-tai/tac-hai-cua-rac-thai-dien-tu-den-moi-truong) (accessed Jul. 30, 2024).
- [4]. P. Tanskanen, “Management and recycling of electronic waste”. *Acta Materialia*, vol. 61, no. 3, pp. 1001-1011, Feb. 2013. doi:10.1016/j.actamat.2012.11.005.
- [5]. H.-Y. Kang and J. M. Schoenung, “Electronic Waste Recycling: A review of U.S. Infrastructure and Technology Options”. *Resources, Conservation and Recycling*, 

- vol. 45, no. 4, pp. 368-400, Dec. 2005. doi:10.1016/j.resconrec.2005.06.001.
- [6]. D. Pant, D. Joshi, M. K. Upreti, and R. K. Kotnala, “Chemical and biological extraction of metals present in E waste: A hybrid technology”. Waste Management, vol. 32, no. 5, pp. 979-990, May 2012. doi:10.1016/j.wasman.2011.12.002.
- [7]. R. Seif, F. Z. Salem, and N. K. Allam, “E-waste recycled materials as efficient catalysts for renewable energy technologies and better environmental sustainability”. Environment, Development and Sustainability, vol. 26, no. 3, pp. 5473-5508, Jan. 2023. doi:10.1007/s10668-023-02925-7.
- [8]. Vaverková, M.D., “Landfill Impacts on the environment-review”. Geosciences 2019, 9, 431.
- [9]. N. Van Thanh, “Optimal waste-to-energy strategy assisted by FUZZY MCDM model for Sustainable Solid Waste Management”. Sustainability, vol. 14, no. 11, p. 6565, May 2022. doi:10.3390/su14116565.
- [10]. G. van de Kaa, J. Rezaei, L. Kamp, and A. de Winter, “Photovoltaic Technology Selection: A Fuzzy MCDM approach”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 32, pp. 662-670, Apr. 2014. doi:10.1016/j.rser.2014.01.044.
- [11]. M. G. Kharat, S. J. Kamble, R. D. Raut, S. S. Kamble, and S. M. Dhume, “Modeling landfill site selection using an Integrated Fuzzy MCDM approach”. Modeling Earth Systems and Environment, vol. 2, no. 2, Mar. 2016. doi:10.1007/s40808-016-0106-x.
- [12]. M. Aghajani Mir et al., “Application of topsis and Vikor improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model”. Journal of Environmental Management, vol. 166, pp. 109-115, Jan. 2016. doi:10.1016/j.jenvman.2015.09.028.
- [13]. M. Govind Kharat et al., “Fuzzy multi-criteria decision analysis for environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection”. Technology in Society, vol. 57, pp. 20-29, May 2019. doi:10.1016/j.techsoc.2018.12.005.
- [14]. H. Asefi and S. Lim, “A novel multi-dimensional modeling approach to Integrated Municipal Solid Waste Management”. Journal of Cleaner Production, vol. 166, pp. 1131-1143, Nov. 2017. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.061.
- [15]. A. Coban, I. F. Ertis, and N. A. Cavdaroglu, “Municipal solid waste management via multi-criteria decision making methods: A case study in Istanbul, Turkey”. Journal of Cleaner Production, vol. 180, pp. 159-167, Apr. 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.130.
- [16]. A. Soltani, K. Hewage, B. Reza, and R. Sadiq, “Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A Review”. Waste Management, vol. 35, pp. 318-328, Jan. 2015. doi:10.1016/j.wasman.2014.09.010.
- [17]. B. Vučijak, S. M. Kurtagić, and I. Silajdžić, “Multicriteria decision making in selecting Best Solid Waste Management scenario: A municipal case study from Bosnia and Herzegovina”. Journal of Cleaner Production, vol. 130, pp. 166-174, Sep. 2016. doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.030.

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP CRITIC VÀ TOPSIS TRONG VIỆC LỰA CHỌN THỦY ĐIỆN XÂY DỰNG NHÀ MÁY NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI NỔI

APPLICATION OF CRITIC AND TOPSIS METHODS IN SELECTING HYDROPOWER PLANTS FOR FLOATING SOLAR POWER PROJECTS

Nguyễn Viết Tịnh, Nguyễn Văn Thành*, Nguyễn Văn Thuận

Bộ môn Logistics và Quản lý Chuỗi cung ứng, Trường Công nghệ Văn Lang,
Trường Đại học Văn Lang

*Email tác giả liên hệ: thanh.nguyenvan@vlu.edu.vn

TÓM TẮT

Năng lượng hóa thạch dù tạo ra sản lượng điện lớn nhưng gây ra nhiều hệ lụy môi trường, khiến việc chuyển sang năng lượng tái tạo trở thành xu hướng tất yếu. Tại Việt Nam, theo Quy hoạch điện VIII, tỷ trọng năng lượng tái tạo đang tăng dần, trong khi thủy điện đã bước vào giai đoạn bão hòa. Do đó, kết hợp thủy điện với điện mặt trời nổi được xem là giải pháp hiệu quả. Tuy nhiên, việc lựa chọn vị trí phù hợp để triển khai điện mặt trời nổi trên hồ thủy điện đòi hỏi đánh giá nhiều tiêu chí. Nghiên cứu này đề xuất mô hình MCDM kết hợp CRITIC và TOPSIS nhằm hỗ trợ lựa chọn vị trí tối ưu. Mô hình được áp dụng tại Việt Nam và có thể mở rộng cho các ứng dụng khác trong lĩnh vực năng lượng.

Từ khoá: MCDM; CRITIC; TOPSIS; Năng lượng mặt trời; Thủy điện tích năng.

ABSTRACT

Although fossil energy generates a large amount of electricity, it causes serious environmental impacts, making the shift to renewable energy an inevitable trend. In Vietnam, under Power Development Plan VIII, the share of renewable energy is increasing, while hydropower has reached a saturation point. Therefore, combining hydropower with floating solar power is considered an effective solution. However, selecting suitable locations for floating solar installations on hydropower reservoirs requires the evaluation of multiple criteria. This study proposes a Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) model that integrates the CRITIC and TOPSIS methods to support optimal site selection. The model is applied in Vietnam and can be extended to other applications in the energy sector.

Keywords: MCDM; CRITIC; TOPSIS; Solar energy; Hydropower reservoirs.

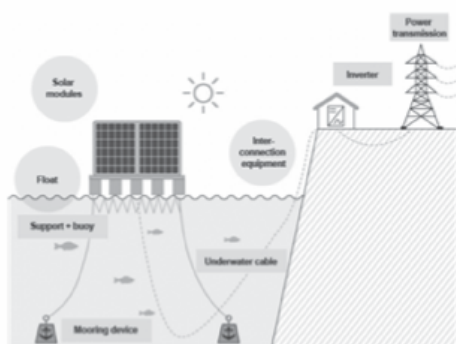


1. GIỚI THIỆU

Năng lượng hóa thạch đóng vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế – xã hội, nhưng đang dần cạn kiệt và gây ra nhiều hệ lụy môi trường nghiêm trọng [1]-[3]. Trong bối cảnh đó, năng lượng tái tạo trở thành giải pháp tất yếu. Năm 2023, công suất năng lượng tái tạo toàn cầu tăng kỷ lục với 473 GW, trong đó điện mặt trời chiếm 346 GW và điện gió đạt 116 GW [4], [5]. Tại Việt Nam, tỷ trọng năng lượng tái tạo đạt 26,4% năm 2022 và hướng đến 71,5% vào năm 2050 theo lộ trình JETP [6, 7].

Việt Nam đứng thứ 8 toàn cầu về công suất lắp đặt điện mặt trời với 16.504 MW [8] và ghi nhận sự tăng trưởng mạnh mẽ của điện gió [9]. Việt Nam sở hữu điều kiện lý tưởng để phát triển năng lượng tái tạo như bức xạ mặt trời cao, tốc độ gió ổn định, và nguồn FDI lớn [10]. Tuy nhiên, việc phụ thuộc thời tiết gây biến động công suất, ảnh hưởng đến ổn định hệ thống điện nếu quá phụ thuộc vào nguồn năng lượng tái tạo [11], [12].

Trong khi tiềm năng phát triển thủy điện đã gần đạt giới hạn [13], [14], mô hình kết hợp điện mặt trời nổi với thủy điện tích năng được xem là giải pháp hiệu quả. Hệ thống này giúp tối ưu vận hành, giảm bốc hơi nước, làm mát tự nhiên và tích trữ năng lượng [15].



Hình 1. Mô hình điện mặt trời nổi [15]

Việt Nam có tài nguyên bức xạ mặt trời dồi dào, đặc biệt tại miền Trung và miền Nam – nơi tập trung nhiều hồ thủy điện lớn [16], [17]. Do đó, việc lựa chọn địa điểm lắp đặt điện mặt trời nổi cần đánh giá đa tiêu chí. Nghiên cứu này đề xuất mô hình MCDM kết hợp CRITIC và TOPSIS nhằm hỗ trợ ra quyết định tối ưu về vị trí triển khai hệ thống điện mặt trời nổi.

2. LƯỢC KHẢO TÀI LIỆU

Phương pháp kết hợp CRITIC và TOPSIS đã được chứng minh là hiệu quả trong các bài toán lựa chọn địa điểm cho dự án năng lượng tái tạo với dữ liệu đa tiêu chí. Nghiên cứu tại Ả Rập Saudi sử dụng mô hình CRITIC–TOPSIS để đánh giá địa điểm xây dựng nhà máy điện mặt trời [18], trong khi Robles-Algarín et al. kết hợp CRITIC với PCA và entropy tại Colombia để lựa chọn hệ thống PV [19]. Bishnoi và Chaturvedi phát triển TOPSIS cải tiến để tái sử dụng khí gas đốt bỏ [20], còn Büyükožkan và Güleriyüz tích hợp AHP mờ với fuzzy TOPSIS để lựa chọn nguồn năng lượng trong điều kiện bất định [21]. Trong lựa chọn thiết bị, Prayogo et al. áp dụng AHP–TOPSIS để chọn bộ nghịch lưu tối ưu [22], và Rajabi et al. kết hợp GIS với TOPSIS để xác định vị trí đập thủy điện tại Iran [23]. Các nghiên cứu này khẳng định tính linh hoạt, khách quan và khả năng mở rộng ứng dụng của mô hình CRITIC–TOPSIS trong quy hoạch năng lượng tái tạo.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

- Phương pháp CRITIC:

Bước 1: Xây dựng ma trận quyết định gồm n phương án và m tiêu chí đánh giá.

$$\text{Max}\{f_1(a), f_2(a), \dots, f_m(a), a \in A\} \quad (1)$$

Bước 2: Chuẩn hóa dữ liệu của từng tiêu chí về khoảng (0,1) theo công thức:

$$x_{aj} = \frac{f_j(a) - f_{j*}}{f_j^* - f_{j*}} \quad (2)$$

Bước 3: Tính độ lệch chuẩn σ_j của tiêu chí j , thể hiện mức độ phân tán và khả năng phân biệt giữa các phương án.

$$x_j = (x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(n)) \quad (3)$$

Bước 4: Tính hệ số tương quan tuyến tính r_{jk} giữa tiêu chí j và các tiêu chí còn lại.

$$\sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (4)$$

Bước 5: Tính lượng thông tin mà mỗi tiêu chí mang lại

$$C_j = \sigma_j \times \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (5)$$

Bước 6: Chuẩn hóa lượng thông tin để tính trọng số cho từng tiêu chí

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad (6)$$

• Phương pháp TOPSIS:

Bước 1: Tạo ma trận đánh giá $(x_{ij})_{m \times n}$ gồm m phương án và n tiêu chí.

Bước 2: Chuẩn hóa ma trận đánh giá theo công thức

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$

Bước 3: Tính ma trận chuẩn hóa có trọng số

$$t_{ij} = r_{ij} \times w_j, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Trong đó:

$$w_j = \frac{w_j}{\sum_{k=1}^n w_k}, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

Bước 4: Xác định phương án tốt nhất (A_b) và tệ nhất (A_w)

- Với tiêu chí lợi ích (J^+):

$$A_b = \max(t_{ij}), A_w = \min(t_{ij}) \quad (9)$$

- Với tiêu chí lợi ích (J^-):

$$A_b = \min(t_{ij}), A_w = \max(t_{ij}) \quad (10)$$

Bước 5: Tính khoảng cách đến phương án tốt nhất d_{ib} và tệ nhất d_{iw}

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2} \quad (11)$$

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2} \quad (12)$$



Bước 6: Tính hệ số gần gũi (CC_i)

$$CC_i = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}} \quad (13)$$

Bước 7: Xếp hạng các phương án dựa trên giá trị CC_i . Phương án có CC_i cao nhất là phương án tối ưu.

4. TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU

Việc lựa chọn địa điểm xây dựng nhà máy điện mặt trời nổi tại Việt Nam chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, đặc biệt trong bối cảnh khí hậu biến đổi nhanh và phức tạp. Trong nghiên cứu này, năm địa điểm thủy điện được đánh giá là có tiềm năng phù hợp với quy mô của dự án bao gồm: Đồng Nai 3 (Đắk Nông), Serepok 3 (Đắk Lắk), Ba Hạ (Phú Yên), Thác Mơ (Bình Phước) và Buôn Kuốp (Đắk Lắk).



Hình 3. Vị trí 5 thủy điện được khảo sát

Các số liệu của các tiêu chí định lượng được thu thập cho với 05 địa điểm thủy điện đã nêu.

• Mô hình CRITIC-TOPSIS:

Ứng dụng mô hình CRITIC-TOPSIS đã cho phép định lượng và phân tích một cách có hệ thống các tiêu chí ảnh hưởng đến quyết định lựa chọn địa điểm. Trọng số của các tiêu chí được xác định bằng phương pháp CRITIC, đảm bảo tính khách quan dựa trên sự biến thiên nội tại của dữ liệu. Sau đó, TOPSIS được sử dụng để xếp hạng các lựa chọn dựa trên khoảng cách đến phương án lý tưởng.

Trong quá trình áp dụng phương pháp CRITIC, các tiêu chí định lượng cần được phân loại thành hai nhóm: tiêu chí thuận lợi (càng cao càng tốt) và tiêu chí bất lợi (càng thấp càng tốt). Để thuận tiện cho quá trình xử lý dữ liệu, trong bảng dữ liệu đầu vào, các tiêu chí thuận lợi được mã hóa với giá trị 1, trong khi các tiêu chí bất lợi được mã hóa với giá trị -1.

Bảng 1. Dữ liệu các tiêu chí đánh giá

	Năng lượng tiêu thụ vùng (Kwh)	PCI (năm 2022)	Sản lượng quang điện (Gwh/năm)	Độ cao (m)	Độ biến thiên sản lượng quang điện (Gwh/năm)	Nhiệt độ trung bình (độ C)	Độ phủ mây (%)	Tốc độ gió (m/s)
Loại tiêu chí	1	1	1	1	-1	-1	-1	1
Đồng Nai 3	1614882825.60	64.87	1.343	577.4	240.13	23	71.013699	5.58

Serepok 3	4620102314.40	60.91	1.396	275.7	200.34	25.6	72.616438	4.59
Ba Hạ	2111128881.20	64.80	1.280	85.9	555.98	25.9	73.671233	5.3
Thác Mơ	2491754374.20	64.32	1.415	193.4	204.07	25.9	69.095890	4.55
Buôn Kuốp	4620102314.40	60.91	1.375	485.6	217.37	24.4	74.369863	5.65

Trên cơ sở áp dụng phương pháp CRITIC đối với bộ dữ liệu đã thu thập, các trọng số tương ứng của từng tiêu chí đã được xác định như sau:

Bảng 2. Kết quả trọng số

Tiêu chí	Trọng số CRITIC
Năng lượng tiêu thụ vùng	0.155396
PCI	0.196726
Sản lượng quang điện	0.083920
Độ cao	0.109316
Độ biến thiên sản lượng quang điện	0.085746
Nhiệt độ trung bình	0.125994
Độ phủ mây	0.098631
Tốc độ gió	0.144270

Tiếp theo, phương pháp TOPSIS được triển khai nhằm xếp hạng các vị trí thủy điện tiềm năng cho việc phát triển dự án điện mặt trời nổi. Dựa trên dữ liệu định lượng đã thu thập, các giá trị được chuẩn hóa để xây dựng ma trận chuẩn hóa phục vụ cho quá trình phân tích:

Bảng 3. Ma trận chuẩn hóa

	Năng lượng tiêu thụ vùng (Kwh)	PCI (năm 2022)	Sản lượng quang điện (Gwh/năm)	Độ cao (m)	Độ biến thiên sản lượng quang điện (Gwh/năm)	Nhiệt độ trung bình (độ C)	Độ phủ mây (%)	Tốc độ gió (m/s)
Loại tiêu chí	1	1	1	1	-1	-1	-1	1
Đồng Nai 3	0.2159	0.4591	0.4408	0.6951	0.3410	0.4117	0.4400	0.4840
Serepok 3	0.6176	0.4311	0.4582	0.3319	0.2845	0.4582	0.4499	0.3981
Ba Hạ	0.2822	0.4586	0.4201	0.1034	0.7896	0.4636	0.4565	0.4597
Thác Mơ	0.3331	0.4552	0.4644	0.2328	0.2898	0.4636	0.4281	0.3947
Buôn Kuốp	0.6176	0.4311	0.4513	0.5846	0.3087	0.4367	0.4608	0.4901



Bằng cách nhân ma trận chuẩn hóa với các trọng số đã được xác định từ phương pháp CRITIC, ta thu được ma trận chuẩn hóa có trọng số, phản ánh mức độ đóng góp tương đối của từng tiêu chí vào quá trình ra quyết định. Từ đó có thể xác định phương án thay thế tối ưu A_b (phương án tốt nhất) và phương án thay thế kém nhất A_w , làm cơ sở để tính toán khoảng cách và hệ số gần đúng trong mô hình TOPSIS:

Bảng 4. Phương án thay thế tốt nhất và tệ nhất

	Năng lượng tiêu thụ vùng (Kwh)	PCI (năm 2022)	Sản lượng quang điện (Gwh/năm)	Độ cao (m)	Độ biến thiên sản lượng quang điện (Gwh/năm)	Nhiệt độ trung bình (độ C)	Độ phủ mây (%)	Tốc độ gió (m/s)
A_b	0.0960	0.0903	0.0390	0.0760	0.0244	0.0519	0.0422	0.0569
A_w	0.0335	0.0848	0.0353	0.0113	0.0677	0.0584	0.0454	0.0707

Tiếp đến, tính toán khoảng cách từ phương án mục tiêu đến phương án tốt nhất d_b và đến phương pháp tệ nhất d_w .

Tiếp theo, tiến hành tính toán khoảng cách từ từng phương án đánh giá đến phương án lý tưởng d_b (tốt nhất) và đến phương án tệ nhất d_w , nhằm phục vụ cho việc xác định hệ số gần gũi CC_i trong mô hình TOPSIS.

Bảng 5. Hệ số gần gũi và xếp hạng của mô hình CRITIC-TOPSIS

	CC_i	Xếp hạng
Đồng Nai 3	0.542301	3
Serepok 3	0.666645	2
Ba Hạ	0.116407	5
Thác Mơ	0.430664	4
Buôn Kuốp	0.822255	1

Thủy điện Buôn Kuốp được xác định là phương án tối ưu nhất với hệ số gần đúng cao nhất ($CC_i = 0.822255$), tiếp theo là Serepok 3 và Đồng Nai 3. Ngược lại, Ba Hạ có điểm số thấp nhất, cho thấy nhiều hạn chế về các yếu tố kỹ thuật và điều kiện tự nhiên.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã phát triển và áp dụng thành công mô hình ra quyết định đa tiêu chí tích hợp CRITIC và TOPSIS nhằm lựa chọn địa điểm phù hợp để xây dựng nhà máy điện mặt trời nổi trên các hồ thủy điện tại Việt Nam. Mô hình cho phép xử lý khách quan các dữ liệu định lượng và đưa ra xếp hạng rõ ràng giữa các phương án. Kết quả cho thấy thủy điện Buôn Kuốp là lựa chọn tối ưu nhất trong 5 địa điểm khảo sát.

Mô hình đề xuất có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các bài toán lựa chọn địa điểm liên quan đến năng lượng tái tạo tại Việt Nam cũng như các quốc gia đang phát triển khác. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc kết hợp thêm các yếu tố định tính thông qua các phương pháp như AHP, ANP kết hợp các kỹ thuật fuzzy có thể giúp nâng cao độ toàn diện và tính thực tiễn của mô hình. Ngoài ra, tích hợp công nghệ GIS và dữ liệu thời tiết lịch sử cũng sẽ tăng độ chính xác trong dự báo và ra quyết định. ❖

Ngày nhận bài: 08/6/2025
Ngày phản biện: 26/6/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Worldometer, “Oil left in the world”. American Library Association (ALA), [Online].
- [2]. S. Bertrand, “Fact Sheet: Climate, Environmental, and Health Impacts of Fossil Fuels”. Environmental and Energy Study Institute, Washington, D.C., 2021.
- [3]. Wikipedia, “Nội chiến Sudan lần thứ hai”. Wikipedia, [Online].
- [4]. D. H. Linh, T. T. Thanh, “Xu hướng chuyển đổi năng lượng tái tạo trên thế giới”. Tạp chí Cộng sản, Feb. 25, 2024.
- [5]. IRENA, “Renewable capacity statistics 2024”. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024.
- [6]. N. L. X. Tuan, “Ngành điện Việt Nam và những điều bạn chưa biết”. Wichart, Sep. 11, 2023.
- [7]. Vietnambiz, “Cơ cấu nguồn điện sẽ thay đổi thế nào sau năm 2030?”. Vietnambiz, May 17, 2023.
- [8]. Tập đoàn Điện lực Việt Nam, “Việt Nam lọt top 10 nơi có công suất lắp đặt năng lượng mặt trời lớn nhất thế giới”. Tập đoàn Điện lực Việt Nam, Nov. 18, 2021.
- [9]. M. Nguyen, “Tỷ trọng điện Mặt Trời và điện gió của Việt Nam tăng nhanh nhất khu vực trong năm 2020”. Thông tấn xã Việt Nam, Sep. 30, 2021.
- [10]. Intracom, “Tiềm năng năng lượng mặt trời ở Việt Nam”. Intracom, Sep. 23, 2023.
- [11]. Cục Điều tiết Điện lực, “Thách thức lớn nhất của phát triển năng lượng tái tạo nằm ở vốn đầu tư”. Cục Điều tiết Điện lực, Oct. 3, 2023.
- [12]. T. B. Thuy, “Phát triển năng lượng tái tạo Việt Nam: Khó khăn, vướng mắc cần tháo gỡ”. Viện Nghiên cứu Chiến lược, Chính sách Công Thương, Aug. 18, 2021.
- [13]. Intracom, “Tiềm năng thủy điện tại Việt Nam và thách thức tương lai”. Intracom, Sep. 12, 2023. [Online].
- [14]. Thủ tướng Chính phủ, “TOÀN VĂN: Quy hoạch điện VIII”. Báo điện tử Chính phủ, May 18, 2023. [Online].
- [15]. Development Asia, “What Makes Floating Solar Farms a Cool Solution”. Development Asia, [Online].
- [16]. Tạp chí Năng lượng Việt Nam, “Cập nhật số liệu khảo sát cường độ bức xạ mặt trời ở Việt Nam”. Tạp chí Năng lượng Việt Nam, Jul. 9, 2020.
- [17]. Global Solar Atlas, Global Solar Atlas, [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?c=12.554564,107.468262,7>. [Accessed 17 08 2024].
- [18]. Hassan, I., Alhamrouni, I., & Azhan, N. H. (2023), “A CRITIC-TOPSIS multi-criteria decision-making approach for optimum site selection for solar PV farm”. *Energies*, 16(10), 4245.
- [19]. Robles-Algarín, C., Castrillo-Fernández, L., & Restrepo-Leal, D. (2024), “Optimal Site Selection for Solar PV Systems in the Colombian Caribbean: Evaluating Weighting Methods in a TOPSIS Framework”. *Sustainability* (2071-1050), 16(20).
- [20]. Bishnoi, D., & Chaturvedi, H. (2022), “Optimised site selection of hybrid renewable installations for flare gas reduction using Multi-Criteria decision making”. *Energy Conversion and Management*: X, 13, 100181.
- [21]. Abdullah, A. G., Nurhikam, Y., Hakim, D. L., Sugito, N. T., & Zakaria, D. (2024), “CRITIC-TOPSIS Method: Design of hybrid renewable energy systems based on multi-criteria decision-making”. *International journal of electrical and computer engineering systems*, 15(8), 705-718.
- [22]. Prayogo, B., Yudisaputro, H., & Kurniawan, A. (2023, December), “Enhancing Renewable Energy Integration: A Hybrid AHP-TOPSIS Approach for Optimal Inverter Selection in Solar PV and Wind Turbine Systems”. In 2023 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG) (pp. 1-6). IEEE.
- [23]. Rajabi, M., Golmehar, E., & MAJIDI, D. (2011), “Developing a TOPSIS-based model for hydropower dam site selection in Isfahan Province”. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, 2(4), 315-324.

THIẾT KẾ THIẾT BỊ HỖ TRỢ ĐIỀU TRỊ PHỤC HỒI CHỨC NĂNG CHI DƯỚI CHO BỆNH NHÂN SAU ĐỘT QUỴ NÃO

DESIGN OF A REHABILITATION DEVICE OF LOWER LIMBS FOR POST STROKE PATIENT

Trương Minh Hiếu, Trần Nguyên Duy Phương*, Trương Quốc Thanh, Nguyễn Văn Thành, Võ Ngọc Cường

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email tác giả liên hệ: tn duyphuong@yahoo.com

TÓM TẮT

Việc phục hồi chức năng chi dưới sau đột quỵ não là một quá trình đòi hỏi thời gian và phương pháp trị liệu phù hợp. Bài báo giới thiệu một thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng với 12 bậc tự do, trong đó gồm 7 bậc tự do dùng để mô phỏng chuyển động của chi dưới và 5 bậc tự do cho phép điều chỉnh vị trí của thiết bị sao cho phù hợp với bệnh nhân, giúp bệnh nhân có thể thực hiện các bài tập ở nhiều tư thế. Thiết bị còn có sự linh hoạt trong việc điều chỉnh độ dài các kích thước để phù hợp với bệnh nhân.

Từ khóa: 12 bậc tự do; Phục hồi chức năng; Chi dưới; Đột quỵ não.

ABSTRACT

The rehabilitation of the lower limbs after a cerebrovascular accident is a process that requires time and appropriate therapy methods. This paper presents a rehabilitation assistance device with 12 degrees of freedom, including 7 degrees of freedom to simulate the movement of the lower limbs and 5 degrees of freedom to adjust the position of the device, helping the patient to perform exercises in any position, allowing the patient to perform exercises in various positions. The device also has flexibility in adjusting the lengths of dimensions to suit the patient.

Keywords: 12-dof; Rehabilitation; Lower limbs; Stroke.

1. GIỚI THIỆU

Phục hồi chức năng được xem xét như phương pháp chính giúp bệnh nhân lấy lại khả năng vận động [1]. Mục đích của phục hồi chức năng là giúp người bệnh đạt được mức độ độc lập chức năng tối đa, giảm đến mức thấp nhất sự suy giảm chức năng.

Phương pháp phục hồi chức năng truyền thống được thực hiện thông qua nhà vật lý trị liệu. Bệnh nhân được hướng dẫn thực hiện các bài tập với người trị liệu, quá trình này lặp đi lặp lại nhiều lần, điều này giúp bệnh nhân lấy lại khả năng vận động. Với số lượng bệnh nhân ngày càng gia tăng, thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng được ra đời, giúp giảm tải khối lượng công việc cho y bác sĩ và phục vụ được

nhiều bệnh nhân hơn. Ngoài ra, việc kết hợp tập với các thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng trong điều trị đem lại hiệu quả cao hơn [2].

Các thiết bị luyện tập vật lý trị liệu phục hồi chức năng phổ biến hiện nay như: ghế tập cơ tứ đầu đùi, thanh xà song song phục hồi chức năng di chuyển, cầu thang bậc có bảo vệ an toàn,... (Hình 1).



Hình 1. Một số thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng phổ biến.

Tuy nhiên, các thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng hiện nay vẫn chưa đáp ứng đầy đủ bảy bậc tự do cần thiết cho chi dưới. Bên cạnh đó, bệnh nhân phải đứng hoặc ngồi khi sử dụng những thiết bị này, nên chúng chỉ phù hợp với những người có thể tự đứng vững hoặc cần hỗ trợ từ dụng cụ. Đối với bệnh nhân nằm liệt giường, không thể tự đứng thì các thiết bị này không phải là giải pháp phù hợp.

Để khắc phục những hạn chế ở trên, bài báo này tập trung vào phát triển thiết kế thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng chi dưới cho bệnh nhân sau đột quỵ não. Thiết bị có các ưu điểm sau: thiết bị có thể mô phỏng chuyển động tự nhiên của chi dưới, giúp bệnh nhân thực hiện các bài tập một cách tối ưu, bên cạnh đó, bệnh nhân còn có thể tập ở mọi tư thế nhờ vào các bậc tự do điều chỉnh vị trí.

2. THIẾT KẾ

2.1. Tổng quan về thiết bị

Thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng chi dưới được thiết kế dựa trên dạng khung xương ngoài và phù hợp với người bệnh thuộc dạng tập bị động (Hình 2). Thiết bị có tổng cộng 12 bậc tự do và được chia thành hai phần chính: cụm tập chi dưới và bộ phận nâng đỡ – định vị. Cụm tập chân gồm 7 bậc tự do dùng để mô phỏng chuyển động của các khớp: háng, gối và mắt cá chân. Bộ phận nâng đỡ – định vị gồm 5 bậc tự do giúp điều chỉnh vị trí thiết bị sao cho phù hợp nhất với người tập.



Hình 2. Thiết kế 3D thiết bị.

Thiết bị sử dụng bộ khung 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 như:

- + Độ chính xác và độ phân giải cao;
- + Không có độ rơ;
- + Hiệu suất cao và ít bảo trì;
- + Vận hành êm ái, độ ồn thấp;
- + Thiết kế nhỏ gọn, trọng lượng nhẹ.

Các động cơ điện và hộp giảm tốc được sử dụng:

- + Maxon EC 45 flat, 30W; EC 90 flat, 90W và EC 60 flat, 200W;
- + Harmonic drive CFS-11-50-2XH-F, CFS-17-120-2UH, CSF-20-160-2UH và CSG-32-160-2UH.



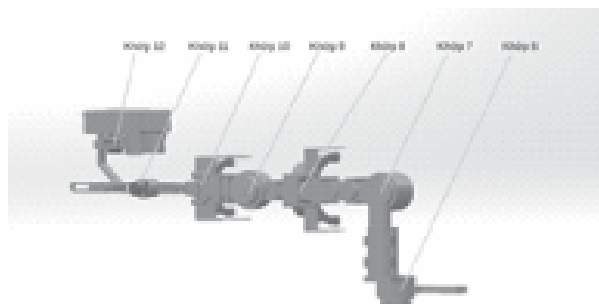
2.2. Cụm tập chi dưới

Cụm tập chi dưới (Hình 3 và Bảng 1) sẽ hỗ trợ bệnh nhân di chuyển chi dưới theo các chuyển động mà chi dưới có thể thực hiện thông qua các khớp. Về mặt cơ y sinh, phần chi dưới có khả năng chuyển động 7 bậc tự do gồm có các dạng chuyển động sau:

+ Khớp háng: Chuyển động khép – mở, hạ – nâng, xoay vào – xoay ra tương ứng với các khớp 6, 7, 8;

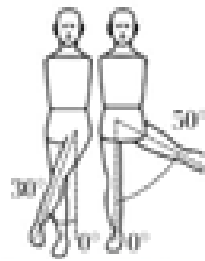
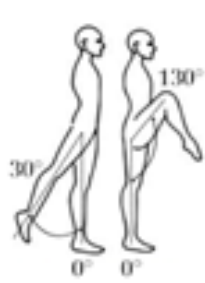
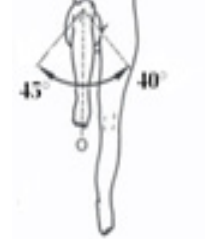
+ Khớp gối: Chuyển động gấp – duỗi,

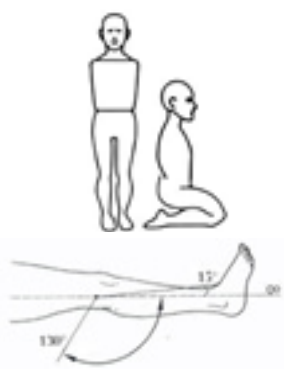
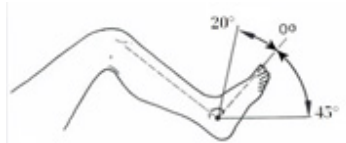
xoay vào – xoay ra tương ứng với các khớp 9, 10;
+ Khớp mắt cá chân: Chuyển động gấp – duỗi, lật ra ngoài – lật vào trong tương ứng với các khớp 11, 12.



Hình 3. Vị trí các khớp của cụm tập chi dưới.

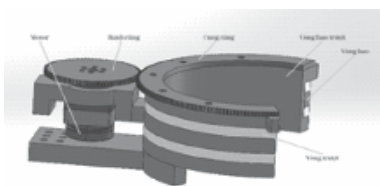
Bảng 1. Tầm vận động của các khớp chi dưới và phạm vi chuyển động mô phỏng tương ứng của thiết bị.

Loại khớp	Khớp trên thiết bị	Tên chuyển động	Tầm vận động của chi dưới [3]	Phạm vi chuyển động của thiết bị	Hình minh họa chuyển động [4]
Khớp háng	Khớp 6	Khép – mở	$30^{\circ} - 0^{\circ} - 50^{\circ}$	$20^{\circ} - 0^{\circ} - 40^{\circ}$	
	Khớp 7	Hạ – nâng	$30^{\circ} - 0^{\circ} - 130^{\circ}$	$0^{\circ} - 100^{\circ}$	
	Khớp 8	Xoay vào – xoay ra	$40^{\circ} - 0^{\circ} - 45^{\circ}$	$30^{\circ} - 0^{\circ} - 30^{\circ}$	

Khớp gối	Khớp 9	Gập – duỗi	$130^{\circ} - 0^{\circ} - 15^{\circ}$	$120^{\circ} - 0^{\circ} - 5^{\circ}$	
	Khớp 10	Xoay vào – xoay ra	$0^{\circ} - 10^{\circ}$	$0^{\circ} - 5^{\circ}$	
Khớp mắt cá chân	Khớp 11	Gập – duỗi	$20^{\circ} - 0^{\circ} - 45^{\circ}$	$15^{\circ} - 35^{\circ}$	
	Khớp 12	Lật ra – lật vào	$20^{\circ} - 0^{\circ} - 30^{\circ}$	$10^{\circ} - 0^{\circ} - 25^{\circ}$	

Cụm 8 là một cụm quan trọng trong cụm khớp háng (khớp 8). Cụm 8 giúp khớp háng chuyển động xoay vào, xoay ra với tầm vận động từ $0 - 45^{\circ}$.

Cấu tạo của cụm 8 gồm: Maxon motor EC 45 flat, brushless, 30 watt tạo chuyển động xoay; vòng bao trượt lắp với vòng trượt và cụm khớp háng 1.



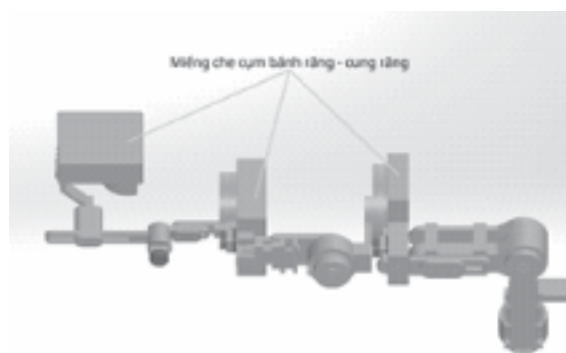
Hình 4. Cấu tạo cụm 8.

Cụm 8 sử dụng cơ cấu truyền động bánh răng và cung răng. Bánh răng gắn với phần dưới motor truyền động qua cung răng gắn trên cụm bắp đùi (Hình 4).

Cụm 10 và cụm 12 được thiết kế giống với cụm 8. Tuy nhiên, tầm vận động của 2 cụm này đã được thay đổi để phù hợp với tầm vận động của các khớp của chi dưới.

Để tránh các sự cố va chạm ngoài ý muốn, các cụm 6, 8, 10 được bố trí thêm miếng che các cơ cấu truyền động bánh răng – cung răng (Hình 5).



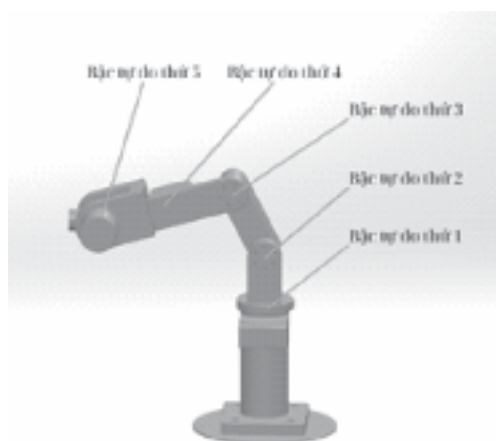


Hình 5. Thiết kế các miếng che chắn.

2.3. Bộ phận nâng đỡ – định vị

Bộ phận nâng đỡ – định vị (Hình 6) vừa có nhiệm vụ giúp cụm tập chi dưới cố định, vừa có nhiệm vụ hỗ trợ điều hướng vị trí của thiết bị sao cho phù hợp với vị trí của người bệnh.

Bộ phận này có 5 bậc tự do chuyển động quay cho phép bệnh nhân có thể thực hiện các bài tập ở mọi vị trí như nằm, ngồi, đứng tùy thuộc vào tình trạng sức khỏe của bệnh nhân.



Hình 6. Thiết kế bộ phận nâng đỡ – định vị.

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày về thiết kế phát triển của thiết bị hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng chi dưới. Thiết bị có những ưu điểm như:

+ Cung cấp 12 bậc tự do với 7 bậc tự do dùng để mô phỏng chuyển động của chi dưới và 5 bậc tự do cho phép điều chỉnh vị trí của thiết bị sao cho phù hợp với bệnh nhân, giúp bệnh nhân có thể thực hiện các bài tập ở nhiều tư thế;

+ Hỗ trợ điều trị phục hồi chức năng ở các giai đoạn với đa dạng bài tập. ❖

Ngày nhận bài: 24/7/2025

Ngày phản biện: 12/8/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. G. E. Gresham et al., “Rehabilitation”. Stroke, vol. 28, no. 7, pp. 1522-1526, Jul. 1997, doi: 10.1161/01.STR.28.7.1522.
- [2]. “The Effect Of A Resonating Arm Exerciser On Arm Function In Patients With Chronic Stroke In Vietnam: A Cross-Over Design”. World Physiotherapy.
- [3]. Kenta Suzuki, G.M., et al., “Intention-Based Walking Support for Paraplegia Patients with Robot Suit HAL”.
- [4]. Sk K. Hasan, “A Realistic Model Reference Computed Torque Control Strategy for Human Lower Limb Exoskeletons”.
- [5]. Bệnh viện Nguyễn Tri Phương, 2021, “Bài tập hồi phục chức năng vận động sau đột quỵ”. <https://bvnguyentriphuong.com.vn/vat-ly-tri-lieu/bai-tap-hoi-phuc-chuc-nang-van-dong-sau-dot-quy>.

HYDRODYNAMIC AND AERODYNAMIC ANALYSIS OF OFFSHORE WIND TURBINE FOUNDATION MODEL USING FINITE ELEMENT METHOD

PHÂN TÍCH THỦY ĐỘNG LỰC HỌC VÀ KHÍ ĐỘNG LỰC CHÂN ĐẾ ĐIỆN GIÓ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Tien Dung Nguyen¹, Ngoc Thai Huynh², Hoang Trong Tran Huy^{2,*}

¹Faculty of Fundamental Sciences, PetroVietnam University, Ba Ria, Vung Tau District, Vietnam

²Ho Chi Minh City University of Industry and Trade, Ho Chi Minh City, Vietnam

*Corresponding author email: huyhtt@huit.edu.vn

ABSTRACT

With the increasing demand for electricity, people have to pay more and more for electricity consumption. There are many natural energy sources to generate electricity. However, wind, water and solar energy will help reduce the cost of generating electricity. However, to generate electricity from wind power, offshore wind power is the strongest and can generate the least expensive electricity. However, it requires the manufacture of a base which is also quite expensive. Therefore, in this study, the design of offshore wind power base is studied. To reduce the cost of testing, this study proposes to perform hydrodynamic and aerodynamic simulations using the finite element method. The analysis results indicated that the design dimensions of the diameter of legs and the diameter of the brace rods were less affected by wind and water. Because the water and wind pressures acting on the model changed insignificantly when the leg diameter and brace rods diameter increased from 1500 mm to 1700 mm and 700 mm to 900 mm, respectively.

Keywords: Offshore wind power foundation; Hydrodynamics; Aerodynamics; Finite element method.

TÓM TẮT

Với nhu cầu sử dụng điện ngày càng tăng, con người phải trả nhiều tiền cho việc tiêu thụ điện. Có nhiều nguồn năng lượng tự nhiên để tạo ra điện. Tuy nhiên, năng lượng gió, nước và mặt trời sẽ giúp giảm chi phí tạo ra điện. Tuy nhiên, để tạo ra điện từ năng lượng gió, năng lượng gió ngoài khơi là mạnh nhất và có thể tạo ra điện ít tốn kém nhất. Tuy nhiên, nó đòi hỏi phải chế tạo một chân đế cũng khá tốn kém. Do đó, trong nghiên cứu này, đã nghiên cứu thiết kế chân đế điện gió ngoài khơi. Để giảm chi phí thử nghiệm, nghiên cứu này đề xuất thực hiện mô phỏng thủy động lực học và khí động học bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong Fluent tool of ANSYS. Kết quả phân tích chỉ ra rằng kích thước thiết kế của đường kính chân và đường kính thanh giằng ít bị ảnh hưởng bởi gió và nước. Bởi vì áp lực nước và gió tác động lên mô hình thay đổi không đáng kể khi đường kính chân và đường kính thanh giằng tăng lần lượt từ 1500 mm lên 1700 mm và 700 mm lên 900 mm.

Từ khóa: Chân đế điện gió ngoài khơi; Thủy động lực học; Khí động lực học; Phương pháp phần tử hữu hạn. 

1. INTRODUCTION

There are many and endless sources of natural energy, such as wind power, solar energy, water... Among them, this source of energy can generate electricity for daily life and industry. Generating electricity from natural energy is a big challenge for researchers. There are many projects that convert wind energy into electricity that have been published. The higher the wind, the stronger the wind, which means the more electrical energy is obtained. Therefore, creating a structure for a wind power foundation is a big challenge for researchers. Wind power foundation are also manufactured in many ways, such as floating offshore wind turbines [1] have been applied to analyze the aerodynamics of the turbine and the hydrodynamics of the offshore wind power platforms structure. The experiment was also performed to validate the numerical simulation results of the proposed model. The wind power platforms structure was made of many parts which are connected by joints which combine adhesive bonding with welding [2]. These joints have helped to significantly reduce the time and cost of manufacturing offshore wind turbine platform models by welding method. However, the proposed joints only meet the needs of medium-sized structures. The cost of placing floating foundations offshore is very high. Therefore, the mooring systems model [3] have been proposed and tested with three different types of mooring systems such as catenary mooring system, tension-leg mooring system, and semi-taut mooring system with numerical simulation models to simulate complex wind turbine dynamics. The optimal U-type Darrieus Wind Turbine [4] was achieved by GA, PSO, SA, and quadratic Response Surface (RS) method combined with NSGA - II based on the analysis of aerodynamic loads and

structural forces of fluid-structure interactions. Numerical results indicated that the proposed model achieves higher efficiency than conventional two- and four-blade turbines. To reduce the impact of wind and sea waves on the Offshore Wind Turbine monopile, a vibration absorption model has been developed [5]. Numerical simulation results of finite element method and fluid dynamics confirm that the proposed vibration control model has improved the service life, reliability and durability of the Offshore Wind Turbine monopile structure. The jacket support structure for offshore wind turbine has been optimized by Topology optimization method [6-8] which has reduced the weight of the structure by 38.24% and significantly improved the stress concentration. The durability and service life of the jacket monopile foundations are significantly improved by optimizing the proposed structural model using a genetic algorithm [9] based on a surrogate model that is converted from a finite element model. The surrogate model can save up to 98.61% of the design time of the jacket monopile foundations model. Wind Energy with Integrated Servo-Control is applied [10] to optimize Several control co-design of floating offshore wind turbines. The results of the proposed method have reduced the energy cost by 4%. The proposed model has significantly improved the structural stability. To reduce the vibration impact of wind and sea waves on offshore wind turbines, distributed tuned mass [11] damper was applied. From the numerical results of finite element analysis, it is shown that the proposed damper model achieves superior performance while wind and sea waves impact on offshore wind turbines.

2. DESIGN OFFSHORE WIND POWER FOUNDATION MODEL

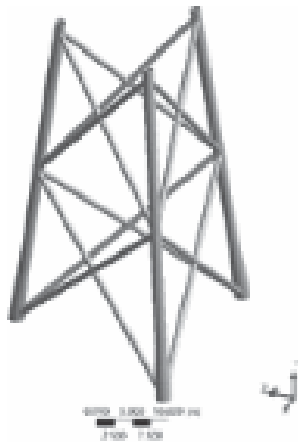


Figure 1. Offshore wind power foundation model

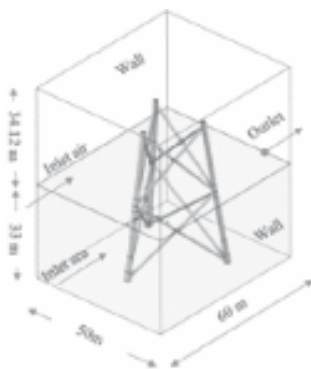


Figure 2. Set up the computational space domain and boundary conditions

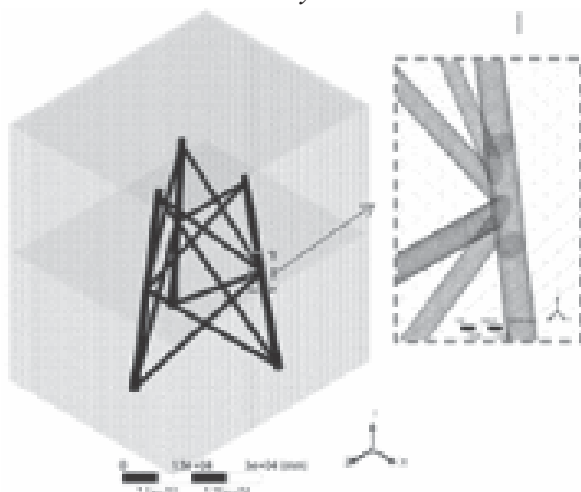


Figure 3. Result of element grid setup

Offshore of the Changhua project – CHW2204. This project is being designed and constructed at the National Energy Center in Vung Tau city, including 33 Suction Bucket Jacket (SBJ) wind power bases with types B, C, D and E corresponding to deep water and shallow water areas. The maximum height for SBJ type E is 83.4 m and the lowest for type B is 73.5 m corresponding to the design depth of the seabed (DSBL) of -40.1 m and -31.5 m respectively. The OWTs wind power base configuration in this study includes 3 main legs and 2 X-bracing floors, this model is designed on Inventor software. Then these models are imported into ANSYS to set up FEM, Fluent simulation. The jacket structure is 60 m high, with the top and bottom widths being 19 m and 32 m respectively. The structure is located at a seabed depth of -31 m. The material used for the main structure is S355 steel (except for secondary structures such as boat landing, stairs, etc.) with mechanical properties such as density $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, Young's modulus $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, shear modulus $G = 8.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$.

3. FINITE ELEMENT MODEL

One of the factors affecting the durability of offshore structures is the flow load of water and wind. And the method of analyzing the interaction between fluid and structure (Fluid – Structure Interaction) is chosen in the structural analysis. The assessment of the mutual impact caused by the interaction between fluid and structure in structural dynamics requires establishing a computational domain for the fluid called the computational space domain. The simulation space is the area surrounding the object limit during the simulation process. Due to the complexity of the simulation, limited computer resources and simulation



time, the simulation space needs to be divided in the most reasonable way with the height, width and length of the computational domain having specific dimensions as shown in Figure 2 to ensure that the entire base structure is in the fluid environment and is true to reality. Because the base structure is affected by 2 fluid flows of seawater and air, the simulation space is divided into 2 main components including seawater and air simulation.

Setting up boundary conditions for the model helps the software solver read and apply automatically and systematically:

- Inlet boundary type: Is the flow area “entering” the calculation domain;
- Outlet boundary type: Is the flow area “leaving” the calculation domain;
- Walls boundary type: Is the area surrounding the model.

In this study, we will focus on analyzing the influence of fluid flow on the base structure. Then the influence of the Tower turbine will be converted into the load acting on the base structure at the interface location.

The ANSYS Meshing function is used to set up the meshing. The purpose is to divide the CAD model into smaller domains and are continuously connected through nodes and edges called elements, on which a set of equations are solved. The meshing work is done through the settings in the software. The mesh in this study is set up for 2 stages, the first stage is set up for Fluent simulation, the second stage is set up for static structural analysis. The software uses the tetrahedral meshing method.

In this study, by applying FEM, the model is divided into small computational domains called meshes including geometric elements and nodes from the Meshing function in ANSYS software. In this study, the settings for meshing the model are detailed as follows:

For the fluid component (Sea - Air): the mesh size is 1000mm, automatically divided by the software.

The structure of the wind power base requires higher precision, so the mesh size is 100mm and follows the tetrahedron meshing method:

- Tetrahedron meshing method: Tetrahedrons;
- Independent patch algorithm: Patch Independent;
- Maximum element mesh size: 100 mm.

Then the number of nodes and geometric elements are: 1212033 and 3087908 respectively as presented in Figure 3. The selection of parameters to be included in the problem is essentially the assignment of conditions and attributes to solve the problem. The parameters included will determine the accuracy and optimization of the simulation.

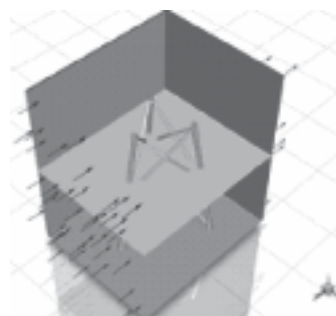


Figure 4. Simulation in Ansys Fluent

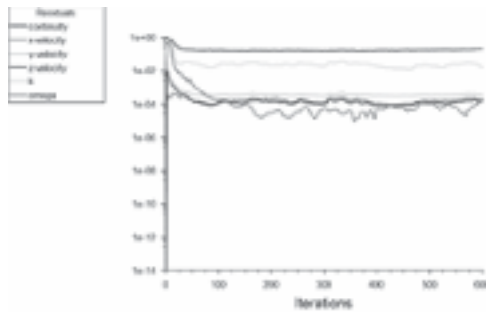


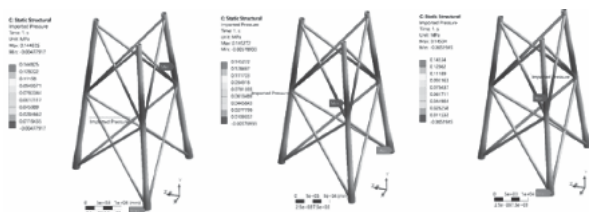
Figure 5. Simulation charts in ANSYS Fluent

The Fluent simulation problem settings include setting the properties and boundary conditions of the CFD model. The boundary conditions are set according to the upstream magnitude field perpendicular to the wall boundary, which will create a hydrodynamic field suitable for the interaction between the fluid and the structure. The solution method will be “Pressure-velocity coupling”. The pressure-based solver is selected in this problem to perform pressure correction. Fluid properties, boundary conditions and numerical approach of CFD model (ANSYS – Fluent).

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Pressure acting on the base model with the change of variable D_2

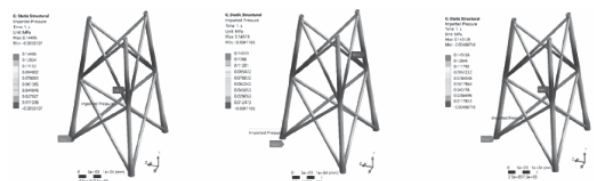
Through the Fluent simulation process, the results obtained are the pressure acting on the wind power base structure frame, shown in Figures 4.2a to 4.2c.



a) $D_2 = 700$ mm b) $D_2 = 800$ mm c) $D_2 = 900$ mm
Figure 6. Effect of variable D_2 on pressure acting on the model

When the variable D_2 increased from 700 mm to 800 mm, the pressures acting on the offshore wind power foundation model were 0.144825 Mpa and 0.145272 MPa, respectively. As the diameter D_2 continued to increase to 900 mm, the pressure acting on the wind power foundation model was 0.14534 MPa. This problem indicated that the diameter dimension D_2 only made a small change to the pressure acting on the offshore wind turbine foundation model. This result was smaller than the results obtained from published works [1-5].

4.2. Pressure acting on the base model with the change of variable D_1



a) $D_1 = 1700$ mm b) $D_1 = 1600$ mm c) $D_1 = 1500$ mm
Figure 7. Distribution of the pressure field

Similarly When the diameter dimension D_1 increased 1600 mm to 1700 mm, the pressures acting on the offshore wind power foundation model were 0.144825 Mpa and 0.145272 MPa, respectively. As the diameter D_1 continued to increase to 1800 mm, the pressure acting on the wind power foundation model was 0.14534 MPa. This problem indicated that the diameter dimension D_2 only made a small change to the pressure acting on the wind turbine foundation model. This result is smaller than the results obtained from published works [1-5].

5. CONCLUSIONS

In this investigation, the offshore wind power foundation model was designed by INVENTOR software. The hydrodynamic and aerodynamic analysis impacted on the studying

model was carried out by using finite element analysis method in fluent tool of ANSYS. The obtained results indicated that when the diameter dimension D_1 increased 1600 mm to 1700 mm, the pressures acting on the offshore wind power foundation model were 0.144825 Mpa and 0.145272 MPa, respectively. As the diameter D_1 continued to increase to 1800 mm, the pressure acting on the wind power foundation model was 0.14534 MPa. When the variable D_2 increased from 700 mm to 800 mm, the pressures acting on the offshore wind power foundation model were 0.144825 Mpa and 0.145272 MPa, respectively. As the diameter D_2 continued to increase to 900 mm, the pressure acting on the wind power foundation model was 0.14534 MPa. This problem indicated that the diameter dimensions D_1 and D_2 only made a small changed to the pressure acting on the offshore wind turbine foundation model. ❖

References:

- [1]. A. Otter, J. Murphy, V. Pakrashi, A. Robertson, and C. Desmond, “A review of modelling techniques for floating offshore wind turbines”. *Wind Energy*, vol. 25, no. 5, pp. 831-857, 2021, doi: 10.1002/we.2701.
- [2]. M. Albiez et al., “Hybrid joining of jacket structures for offshore wind turbines – Validation under static and dynamic loading at medium and large scale”. *Engineering Structures*, vol. 252, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113595.
- [3]. M. Barooni, T. Ashuri, D. Velioglu Sogut, S. Wood, and S. Ghaderpour Taleghani, “Floating Offshore Wind Turbines: Current Status and Future Prospects”. *Energies*, vol. 16, no. 1, 2022, doi: 10.3390/en16010002.
- [4]. S.-H. Ju and C.-H. Hsieh, “Optimal wind turbine jacket structural design under ultimate loads using Powell's method”. *Ocean Engineering*, vol. 262, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112271.
- [5]. A. Kampitsis, K. Kapasakalis, and L. Via-Estrem, “An integrated FEA-CFD simulation of offshore wind turbines with vibration control systems”. *Engineering Structures*, vol. 254, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113859.
- [6]. X. Tian et al., “Optimization design of the jacket support structure for offshore wind turbine using topology optimization method”. *Ocean Engineering*, vol. 243, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110084.
- [7]. C. Zhang, K. Long, J. Zhang, F. Lu, X. Bai, and J. Jia, “A topology optimization methodology for the offshore wind turbine jacket structure in the concept phase”. *Ocean Engineering*, vol. 266, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112974.
- [8]. X. Tian, G. Liu, W. Deng, Y. Xie, and H. Wang, “Fatigue constrained topology optimization for the jacket support structure of offshore wind turbine under the dynamic load”. *Applied Ocean Research*, vol. 142, 2024, doi: 10.1016/j.apor.2023.103812.
- [9]. S. Zheng, C. Li, and Y. Xiao, “Efficient optimization design method of jacket structures for offshore wind turbines”. *Marine Structures*, vol. 89, 2023, doi: 10.1016/j.marstruc.2023.103372.
- [10]. N. J. Abbas, J. Jasa, D. S. Zalkind, A. Wright, and L. Pao, “Control co-design of a floating offshore wind turbine”. *Applied Energy*, vol. 353, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122036.
- [11]. S. Elias, “Vibration improvement of offshore wind turbines under multiple hazards”. *Structures*, vol. 59, 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105800.

VIBROACOUSTIC BEHAVIOR OF A CLAMPED DOUBLE-COMPOSITE PLATE FILLED WITH AN AIR CAVITY IN THERMAL ENVIRONMENT

ỨNG XỬ DAO ĐỘNG ÂM QUA TẤM KÉP COMPOSITE CÓ KHOANG KHÍ NGẦM BỐN CẠNH TRONG MÔI TRƯỜNG NHIỆT

Pham Ngoc Thanh*, Phung Xuan Son

Hanoi University of Industry

*Email: thanhpham1986@gmail.com

ABSTRACT

This paper is a study of the vibroacoustic behavior of a finite laminated double - composite rectangular plate filled with an air cavity under a sound wave excitation in thermal environments is investigated analytically. Using the method of modal decomposition, a double Fourier series solution is obtained to characterize the vibroacoustic performance of the structure. The sound transmission loss (STL) is calculated from the ratio of incident to transmitted acoustic powers.

Keywords: *Vibroacoustic behavior; Laminated composite plate; Sound transmission loss; Thermal loads.*

TÓM TẮT

Bài báo này là một nghiên cứu về ứng xử dao động âm của một tấm kép composite lớp hình chữ nhật, hữu hạn chứa khoang khí bị kích thích bởi sóng âm trong môi trường nhiệt được nghiên cứu và phân tích. Sử dụng phương pháp tách mode, chuỗi Fourier kép để mô tả dạng dao động âm của kết cấu tấm. Tổn thất truyền âm (STL) được tính theo tỷ số công suất âm truyền tới với công suất âm truyền qua.

Từ khóa: *Ứng xử dao động âm; Tấm composite lớp; Tổn thất truyền âm; Tải nhiệt.*

1. INTRODUCTION

The double-plate is widely used as in construction structures, ships, turbofan, aerospace, etc. These structures are invariably exposed to the thermal and noise environment in their service life, especially as a component of the hypersonic aircraft. Therefore, research on sound insulation capacity of double-plate

in thermal environment has received much attention from researchers in the world to produce the most optimal structures.

The vibroacoustic behavior of the double-plates filled with absorbent materials has been extensively investigated. For example, Carneal and Fuller [1] presented an analytical and experimental study of active structural acoustic



control of noise transmission through aluminum double panel systems. Chazot and Guyader [2] studied the sound transmission loss through finite double-panels by using a patch-mobility method. This method and FEM give the same results when comparing transmission loss of double aluminum plates. In [3] a finite element formulation for sound transmission through double wall sandwich panels with viscoelastic core is presented by Larbi et al. Lu and Xin [5] presented an analytical approach to investigate the sound transmission across rectangular metallic (isotropic) double-panel structure containing an air cavity under various boundary constraints by using the method of modal function and the weighted residual (Galerkin) method. More recently, Thinh and Thanh [6-9] calculated the sound transmission loss through a finite single and double-composite plate in thermal and air environment with different boundary conditions (clamped and simply supported). The effect of some parameters on the sound insulation ability of the plate structure is considered.

The objective of this study is to develop a model to describe accurately the sound transmission across a finite clamped laminated double-composite plate filled with air cavity in thermal environment. Thereby, assessing the influence of several key system parameters on sound transmission loss including the faceplate thickness and the air cavity thickness are systematically examined.

2. THEORETICAL FORMULATION

2.1. Geometry and assumptions

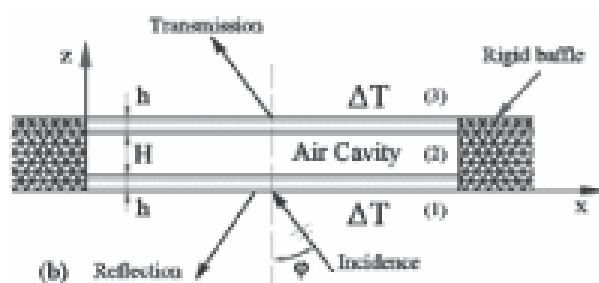
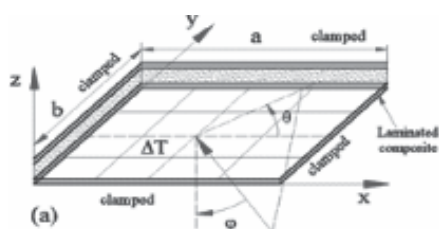


Figure 1. Schematic of STL through a double-composite plate: (a) Global view and (b) side view.

Supposedly, a finite rectangular double-composite plate with air cavity is in an infinite large acoustic rigid baffle. The two single-plates are orthotropic laminated composite and have similar geometric parameters and mechanical properties. The bottom and upper plates (Fig. 1) have thicknesses h and is separated by an air cavity of thickness H . The double-plate partition divides the spatial space into two fields, i.e., sound incidence field ($z < 0$) and sound transmitting field ($z > H + 2h$).

A plane sound wave varying harmonically in time is oblique (with the incident angle, φ and azimuth angle, θ) and stimulates the vibration of the bottom plate. This vibration changes the pressure in the air cavity and causes vibration of the upper plate then the sound wave is transmitted into the upper domain.

2.2. Laminated composite plate dynamics

The vibroacoustic behavior of an orthotropic symmetric double-composite plate with air cavity in thermal environment (Fig. 1) induced by sound excitation is governed by [8, 9]:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w_1(x, y, t)}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w_1(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w_1(x, y, t)}{\partial y^4} + m^* \frac{\partial^2 w_1(x, y, t)}{\partial t^2} - \left(N_1 \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} + N_2 \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = j\omega\rho_0 [\Phi_1(x, y, z; t) - \Phi_2(x, y, z; t)] \quad (1)$$

$$D_{11} \frac{\partial^4 w_1(x, y, t)}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w_1(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w_1(x, y, t)}{\partial y^4} + m^* \frac{\partial^2 w_1(x, y, t)}{\partial t^2} - \left(N_1 \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial x^2} + N_2 \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = j\omega\rho_0 [\Phi_2(x, y, z; t) - \Phi_3(x, y, z; t)] \quad (2)$$

Where $w_{1,2}$ are the transverse displacements of the two single-plates; D_{ij} ($ij = 11, 12, 22, 66$) are the flexural rigidities; m^* is the surface density of the upper and bottom plates; ρ_0 is the air density, ω is the angular frequency of the incident sound and Φ_i ($i = 1, 2, 3$) denote the velocity potentials for the acoustic fields in the proximity of the two plates, corresponding to the sound incidence, the air cavity, and the transmitting field, respectively. N_i ($i = 1, 2$) are constants determined by:

$$N_i = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} [Q_{ij}]_k \alpha_j \Delta T dz \quad (i, j = 1, 2) \quad (3)$$

Where: α_j ($j = 1, 2$) are coefficients of thermal expansion in longitudinal and transverse direction; ΔT is temperature difference (is assumed to be constant in this study).

The displacements of the two composite faceplates induced by the incident sound can be expressed as:

$$w_1(x, y, t) = w_0 e^{-j(k_x x + k_y y - \omega t)}; w_2(x, y, t) = w_0 e^{-j(k_x x + k_y y - \omega t)} \quad (4)$$

The acoustic velocity potential in the incidence field (Fig.1) is defined:

$$\Phi_1(x, y, z; t) = I e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)} + \beta e^{-j(k_x x + k_y y - k_z z - \omega t)} \quad (5)$$

Where I and β are the amplitudes of the incident (positive-going) and the reflected plus radiated (negative-going) waves, respectively. Similarly, the velocity potential in the air cavity can be written as:

$$\Phi_2(x, y, z; t) = \varepsilon e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)} + \psi e^{-j(k_x x + k_y y - k_z z - \omega t)} \quad (6)$$

Where ε is the amplitude of the positive-going wave and ψ is the amplitude of the negative-going wave. In the transmitting field adjacent to the transmitting upper plate, there exist no reflected waves, and therefore the velocity potential in the transmitted waves is given by:

$$\Phi_3(x, y, z; t) = \gamma e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)} \quad (7)$$

Where γ is the amplitude of the transmitted (positive-going) wave.

These wavenumbers are determined by the incident angle, φ and azimuth angle, θ of the incident sound wave as:

$$k_x = k_0 \sin \varphi \cos \theta; k_y = k_0 \sin \varphi \sin \theta; k_z = k_0 \cos \varphi \quad (8)$$

Where $k_0 = \omega/c_0$ is the acoustic wave number in air and c_0 is the acoustic speed in the air.

The boundary conditions for the clamped double-composite plate can be expressed as:



$$\text{At } x=0, a, \quad w_1 = w_2 = 0, \quad \frac{\partial w_1}{\partial x} = \frac{\partial w_2}{\partial x} = 0; \quad (9)$$

$$\text{At } y=0, b, \quad w_1 = w_2 = 0, \quad \frac{\partial w_1}{\partial y} = \frac{\partial w_2}{\partial y} = 0$$

At the air-plate interface, the normal velocity is continuous, yielding the corresponding velocity compatibility condition equations:

$$\begin{aligned} \text{At } z=0, \quad -\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} &= j\omega w_1; \quad z=h, \quad -\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = j\omega w_1; \\ z=h+H, \quad -\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} &= j\omega w_2; \quad z=2h+H, \quad -\frac{\partial \Phi_3}{\partial z} = j\omega w_2 \end{aligned} \quad (10)$$

The flexural motions of the bottom and upper plates induced by a time-harmonic incident plate sound wave can be expressed in the form of double series as:

$$\begin{aligned} w_1(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{mn}(x, y) q_{1,mn}(t); \\ w_2(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{mn}(x, y) q_{2,mn}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Where the modal function φ_{mn} and modal displacements $q_{i,mn}$ ($i = 1, 2$) for the clamped bound-ary conditions are given by [7, 8, 9]:

$$\varphi_{mn}(x, y) = \left(1 - \cos \frac{2m\pi x}{a}\right) \left(1 - \cos \frac{2n\pi y}{b}\right) \quad (12)$$

$$q_{1,mn}(t) = \alpha_{1,mn} e^{j\omega t}, \quad q_{2,mn}(t) = \alpha_{2,mn} e^{j\omega t} \quad (13)$$

Where $\alpha_{1,mn}$; $\alpha_{2,mn}$ are the modal coefficients of the bottom and supper plates, respectively.

Thus, the velocity potentials for the sound incident region, air cavity, and sound transmit-ting region may be expressed as:

$$\Phi_1(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \varphi_{mn} e^{-j(k_z z - \omega t)} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{mn} \varphi_{mn} e^{-j(-k_z z - \omega t)} \quad (14)$$

$$\Phi_2(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_{mn} \varphi_{mn} e^{-j(k_z z - \omega t)} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{mn} \varphi_{mn} e^{-j(-k_z z - \omega t)} \quad (15)$$

$$\Phi_3(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_{mn} \varphi_{mn} e^{-j(k_z z - \omega t)} \quad (16)$$

Where the coefficients I_{mn} , β_{mn} , ε_{mn} , ψ_{mn} and γ_{mn} for the clamped double-composite plate are determined by:

$$\chi_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^b \int_0^a \chi e^{-j(k_z x + k_y y)} \cos \frac{2m\pi x}{a} \cos \frac{2n\pi y}{b} dx dy \quad (18)$$

Here, the symbol χ can be referred to any of the coefficients I_{mn} , β_{mn} , ε_{mn} , ψ_{mn} and γ_{mn} .

Using the displacement continuity condition at air-plate interfaces [10] and substituting Eqs. (14) - (16) into Eqs. (18) leads to:

$$\beta_{mn} = I_{mn} - \frac{\omega}{k_z} \alpha_{1,mn}; \quad \varepsilon_{mn} = \frac{\omega(\alpha_{1,mn} e^{jk_z H} - \alpha_{2,mn})}{k_z (e^{-jk_z(h-H)} - e^{-jk_z(H+h)})} \quad (19)$$

$$\psi_{mn} = \frac{\omega(\alpha_{2,mn} - \alpha_{1,mn} e^{-jk_z H})}{k_z (e^{jk_z(h-H)} - e^{jk_z(H+h)})}; \quad \gamma_{mn} = \frac{\omega \alpha_{2,mn} e^{jk_z(H+2h)}}{k_z} \quad (20)$$

Substituting Eqs. (11) and (19) - (20) into Eqs. (1) - (2) and applying the orthogonal properties of modal functions, one gets:

$$\ddot{q}_{1,mn}(t) + \omega_{1,mn}^2 q_{1,mn}(t) - \frac{j\omega \rho_0}{m^*} \left[\frac{(I_{mn} - \varepsilon_{mn}) e^{-j(k_z z - \omega t)} + (\beta_{mn} - \psi_{mn}) e^{-j(-k_z z - \omega t)}}{+ 4N_1 \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + 4N_2 \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \right] = 0 \quad (21)$$

$$\ddot{q}_{2,mn}(t) + \omega_{2,mn}^2 q_{2,mn}(t) - \frac{j\omega \rho_0}{m^*} \left[\frac{(\varepsilon_{mn} - \gamma_{mn}) e^{-j(k_z z - \omega t)} + \psi_{mn} e^{-j(-k_z z - \omega t)}}{+ 4N_1 \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + 4N_2 \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \right] = 0 \quad (22)$$

Where: $\ddot{q}_{i,mn}(t)$ ($i = 1, 2$) are the second derivatives of the displacement of the bottom and upper plates, respectively, $q_{i,mn}(t)$;

$\omega_{i,mn}$ ($i = 1, 2$) are the natural frequencies of the two single-leaf plates are orthotropic laminated composite are determined by:

$$\omega_{i,mn}^2 = \frac{\pi^4}{m^4 b^4} \left[D_{11} m^4 \frac{48}{9} \left(\frac{b}{a} \right)^4 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{16}{9} m^2 n^2 \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{48}{9} D_{22} n^4 \right] + \frac{\pi^2}{I^*} \left[N_1 \left(\frac{m}{a} \right)^2 + N_2 \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \quad (23)$$

Where: $I^* = \sum_{k=1}^n \rho_0^{(k)} (h_{k+1} - h_k)$. Therefore, the modal coefficients, $\alpha_{i,mn}$ is determined by used Eq. (13), Eqs. (21) and (22) can be rewritten in matrix form as:

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_{1,mn} \\ \alpha_{2,mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (24)$$

With:

$$\begin{aligned} X_{11} &= \omega_{1,mn}^2 - \omega^2 - \frac{j\omega^2 \rho_0}{k_z m^4} \left[\frac{e^{jk_z H}}{e^{-jk_z(h-H)} - e^{-jk_z(H+h)}} - \frac{e^{-jk_z H}}{e^{jk_z(h-H)} - e^{jk_z(H+h)}} \right] \\ X_{12} &= \frac{j\omega^2 \rho_0}{k_z m^4} \left[\frac{1}{e^{-jk_z(h-H)} - e^{-jk_z(H+h)}} - \frac{1}{e^{jk_z(h-H)} - e^{jk_z(H+h)}} \right] \\ X_{21} &= \frac{j\omega^2 \rho_0}{k_z m^4} \left[\frac{e^{jk_z H}}{e^{-jk_z(h-H)} - e^{-jk_z(H+h)}} - \frac{e^{-jk_z H}}{e^{jk_z(h-H)} - e^{jk_z(H+h)}} \right] \\ X_{22} &= \omega_{2,mn}^2 - \omega^2 - \frac{j\omega^2 \rho_0}{k_z m^4} \left[\frac{1}{e^{jk_z(h-H)} - e^{jk_z(H+h)}} - \frac{1}{e^{-jk_z(h-H)} - e^{-jk_z(H+h)}} + e^{jk_z(H+2h)} \right] \\ Y &= \frac{2j\omega \rho_0 I_{mn}}{m^4} \end{aligned} \quad (25)$$

After solving the system of equations (24), the unknown coefficients $\alpha_{1,mn}$ and $\alpha_{2,mn}$ are determined, all the other quantities such as $w_{1,mn}$, $w_{2,mn}$ and the coefficients (β_{mn} , ε_{mn} , ψ_{mn} and γ_{mn}) are also determined. Thence, the analysis of sound transmission across a clamped double-composite plate is completely solved.

2.3. Definition of sound transmission loss

The power of incident sound is defined [7, 8]:

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_A p_1 v_1^* dA \quad (26)$$

The transmitted sound power is defined [7, 8]:

$$\Pi_3 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \iint_A p_3 v_3^* dA \quad (27)$$

Where: v_1^* , v_3^* , p_1 , p_3 are the local acoustic velocity, the sound pressure in the incident field and the transmitted field, respectively.

The sound transmission loss across the laminated double-composite plate is defined by [7, 8, 9]:

$$STL = 10 \log_{10} \left(\frac{\Pi_1}{\Pi_3} \right) \quad (28)$$

3. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Validation

The present analytical approach is validated by comparing the predicted STL with the theoretical and experimental results of Carneal and Fuller [1] as shown in Fig. 2 for a finite double-plate is excited by wave varying harmonically with incident angle, $\varphi = 30^\circ$ and azimuth angle, $\theta = 30^\circ$ and thermal load, $\Delta T = 0^\circ \text{C}$. The double-plate partition considered consists of two identical metallic (isotropic plates). The geometrical dimensions of the plates are: length of plate $a = 1 \text{ m}$, width of plate $b = 1 \text{ m}$. The plate have thickness $h = 2 \text{ mm}$ while the thickness of the air cavity is $H = 0.08 \text{ m}$. The mechanical properties of aluminum materials are: $E = 70 \text{ GPa}$; $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$; $\nu = 0.33$. Speed of sound in air, $c = 343 \text{ m/s}$; the density of the air, $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$ and the initial amplitude, $I_0 = 1 \text{ m}^2/\text{s}$.



Fig. 2 indicates clearly that the present analytical predictions are in good agreement with the experimental measurements than the theoretical predictions of Carneal and Fuller [1]. Notice first that the experimental results are not reliable for frequencies below 50 Hz where the flanking paths of the test facility play a prominent role in measurements. Second, the extra dips in the experiment curve compared with the theoretical curves associated with 240-270 Hz and 490-570 Hz modes are attributed to the imperfect normal acoustic plane wave and/or the structural flanking path, as emphasized by Carneal and Fuller [1].

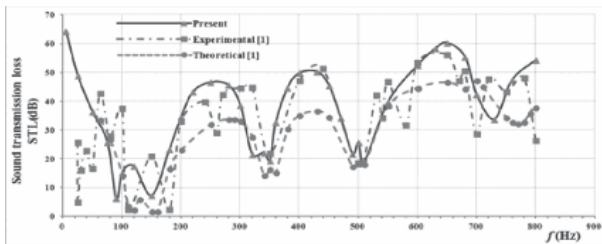


Figure 2. Comparison of the present analytical predictions with the theoretical and experimental results of Carneal and Fuller [1].

3.2. Influence of faceplate thickness (h) on STL

The influence of composite materials on STL through a finite clamped double-Graph-ite/Epoxy composite plate is studied in this section by selecting three values of plate thickness are chosen: $h = 2\text{mm}$, 5mm and 10mm are excited by wave varying harmonically with incident angle, $\varphi = 30^\circ$ and azimuth angle, $\theta = 30^\circ$ under thermal load, $\Delta T = 20^\circ\text{C}$. The composite plates are composed of 8 balanced, symmetrical layers, with a configuration of $[0/90/0/90]_s$ with the mechanical properties: $E_1 = 137\text{GPa}$; $E_2 = 10\text{GPa}$; $G_{12} = 5\text{GPa}$; $\nu = 0.3$; $\rho = 1590\text{kg/m}^3$. The geometrical dimensions of the plates are: length of plate, $a = 1\text{m}$; width of plate, $b = 1\text{m}$ and thickness of the air cavity, H

$= 0.08\text{m}$ remain unchanged. Speed of sound in air, $c = 343\text{m/s}$; the density of the air, $\rho_0 = 1.21\text{kg/m}^3$ and the initial amplitude, $I_0 = 1\text{m}^2/\text{s}$.

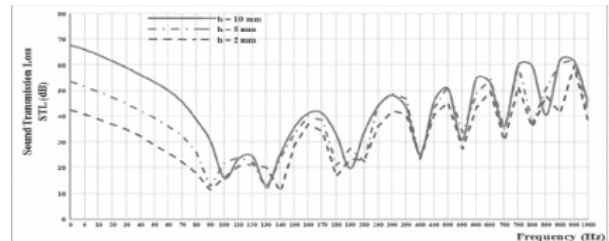


Figure 3. Effects of plate thickness on STL

According to Fig. 3, the STL value increases sharply when increasing the thickness of the bottom and upper plates. The effect of thickness of faceplate for STL is particularly strong at frequencies lower than 100Hz under thermal load. This is a very important region when de-signing finite dual sound insulation plates in practice. In the higher frequency region ($f > 100\text{Hz}$), the effect of thermal loading is stronger and the strong interaction between the individual behavior of the single plates (top and bottom) and the overall behavior of the finite double plate system makes the peaks and troughs appear denser and more complex.

3.3. Influence of air cavity thickness (H) on STL

To demonstrate the influence of air cavity thickness on STL, the STLs are calculated for a finite double-Graphite/Epoxy composite plate under thermal loads, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ and $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ with selected values of air cavity thickness: $H = 0.02\text{m}$; 0.04m and 0.08m ; $h_1 = h_2 = 2\text{mm}$, as shown in Fig. 4. The other geometrical and material parameters are the same as section 4.2 and normal sound excitation is imposed.

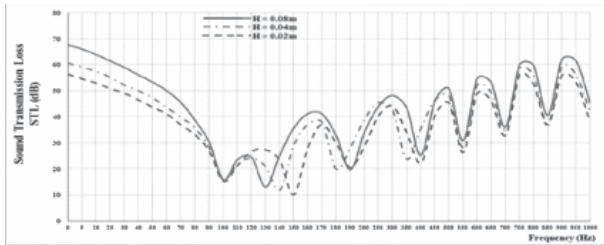


Figure 4. Effects of air cavity thickness on STL

According to Fig. 4, the first dip position does not depend on the air cavity thickness because it completely depends on the surface density of the plate. However, the second dip position changes drastically when the air cavity thickness increases (moving toward the lower frequency) due to the plate-cavity-plate resonance and thermal load a major role in this case. Their remaining positions are almost unchanged because the plate-cavity-plate is operating synchronously under thermal load.

4. CONCLUSIONS

In this investigation, an analytical model was developed to study the sound transmission loss through a finite double-laminated composite plate with the clamped boundary conditions excited by a plane sound wave varying harmonically in thermal environment. From the results obtained, some conclusions can be drawn:

- The theoretical predictions are in good agreement with existing results.
- Increasing the plate thickness (equivalent to increasing the surface mass) enhances considerably the sound insulation property of the clamped double-plates. The influence of plate thickness on STL is particularly strong for finite systems at low frequencies.

- As the thickness of the air cavity increases, the sound insulation capacity of the double plate also increases but is not as strong as increasing the thickness of bottom and upper plate. ❖

References:

- [1]. J. P. Carneal and C. R. Fuller, "An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems". J. Sound Vib. 272, 749-771 (2004).
- [2]. J. D. Chazot and J. L. Guyader, "Prediction of transmission loss of double panels with a patch-mobility method". J. Acoust. Soc. Am. 121, 267-278 (2007).
- [3]. W. Larbi, J.F. Deü, R. Ohayon, "Vibroacoustic analysis of double-wall sandwich panels with viscoelastic core". Computers and Structures, 174, 92-103 (2016).
- [4]. S.F. G. Leppington, E. G. Broadbent, G. F. Butler, "Transmission of sound through a pair of rectangular elastic plates". J. Appl. Math 71(6), 940-955 (2006).
- [5]. T. J. Lu and F. X. Xin, "Vibro-acoustics of Lightweight Sandwich". Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2014).
- [6]. T.I. Thinh and P.N. Thanh, "Vibroacoustic analysis of a clamped finite orthotropic laminated double-composite plate with an air cavity". Vietnam Journal of Mechanics, VAST, Vol. 41(3), pp. 257-272, (2019).
- [7]. P.N. Thanh and T.I. Thinh, "Sound transmission loss across a finite simply supported double-laminated composite plate with enclosed air cavity". Vietnam Journal of Science and Technology, Vol 57 (6), pp 749-761, (2019).
- [8]. T.I. Thinh and P. N. Thanh, "Vibroacoustic behavior of a rectangular composite plate in thermal environment". Vietnam Journal of Mechanics, Vol 4, pp 445-458, (2022).
- [9]. P.N. Thanh and T.I. Thinh, "Effect of temperature on sound transmission loss of laminated composite plate". Vietnam Journal of Mechanics, Vol 4, pp 405-417, (2022).

LILAMA 10 tiếp tục khẳng định bản lĩnh và năng lực tại Dự án Thủy điện Hòa Bình mở rộng

Sáng 19/8/2025, Tổ máy số 1 của Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng chính thức hòa lưới điện quốc gia, sớm hơn kế hoạch hơn một tháng. Đây không chỉ là cột mốc kỹ thuật quan trọng mà còn là công trình mang ý nghĩa chính trị - xã hội đặc biệt, chào mừng 80 năm Cách mạng Tháng Tám và Quốc khánh 2/9.

Để có được kết quả này, hàng loạt hạng mục then chốt đã được hoàn thành đúng và vượt chuẩn: chạy thử không tải Tổ máy số 1 ở mức 100% công suất, thử vượt tốc 160% thành công, đóng điện máy biến áp, thử cao thế trạm GIS 500kV... Tất cả minh chứng cho sự đồng bộ, an toàn và chất lượng cao, khẳng định năng lực vượt trội của các đơn vị tham gia, trong đó có vai trò chủ công của Công ty Cổ phần LILAMA 10.



Tổng Giám đốc LILAMA 10 - Ông Nguyễn Đình Tình (thứ 2 từ trái qua) tham dự lễ cắt băng khánh thành phát điện tổ máy số 1

Bước ngoặt từ Tổ máy số 1

Trong hai ngày 14 – 15/8, LILAMA 10 đã phối hợp cùng chủ đầu tư và các nhà thầu tiến hành chạy thử không tải Tổ máy số 1. Các thông số kỹ thuật đều đạt chuẩn, từ công suất tối đa đến thử vượt tốc, mở ra điều kiện để tổ máy chính thức hòa lưới điện vào ngày 19/8. Việc hoàn thành trước tiến độ hơn một tháng đã tạo nên dấu ấn đặc biệt, khi thành quả này gắn liền với không khí cả nước kỷ niệm 80 năm Quốc khánh.

Dự án Thủy điện Hòa Bình mở rộng có quy mô công suất 2×240 MW (tổng cộng 480 MW), mỗi năm dự kiến cung cấp khoảng 500 triệu kWh điện cho hệ thống quốc gia. Đây là công trình có ý nghĩa chiến lược, không chỉ bổ sung nguồn điện quan trọng, tăng khả năng điều tiết nước, giảm tải cho Nhà máy Thủy điện Hòa Bình cũ, mà còn góp phần củng cố an ninh năng lượng trong bối cảnh nhu cầu điện ngày càng tăng cao.

Trong dự án, LILAMA 10 đảm nhận những hạng mục then chốt: lắp đặt toàn bộ đường ống áp lực, thiết bị cơ khí thủy công, cơ – điện của nhà máy. Đến giữa tháng 8, khối lượng công việc của Tổ máy số 1 đã đạt 98%. Nhiều hạng mục quan trọng như cửa nhận nước, đường hầm cửa ra hạ lưu, trạm GIS 500 kV, thí nghiệm máy biến áp... đã cơ bản hoàn tất, tạo nền tảng vững chắc cho việc phát điện an toàn.



Tổng Giám đốc LILAMA - Ông Nguyễn Văn Hùng, Chủ tịch HĐQT LILAMA 10 - Ông Đặng Văn Long và Tổng giám đốc LILAMA 10 - Ông Nguyễn Đình Tình (ảnh từ trái qua phải) tham dự buổi lễ.

Tăng tốc thi công Tổ máy số 2

Không dừng lại ở thành công Tổ máy số 1, LILAMA 10 đang tập trung nguồn lực cho Tổ máy số 2. Hiện tiến độ đã đạt khoảng 30% với những hạng mục trọng yếu như tổ hợp rotor, lắp đặt tuốc bin, máy phát và hệ thống phụ trợ.

Đặc biệt, ngày 16/8 vừa qua, LILAMA 10 đã lắp đặt thành công bánh xe công tác nặng 110 tấn cho Tổ máy số 2. Đây là một thiết bị siêu trọng, có ý nghĩa quyết định trong quá trình lắp đặt, đòi hỏi sự phối hợp chính xác, an toàn tuyệt đối giữa các kỹ sư và công nhân. Sự kiện này được xem là một trong những cột mốc kỹ thuật quan trọng, mở đường cho việc hoàn thiện tổ hợp rotor và các bước lắp đặt tiếp theo.

Theo kế hoạch, Tổ máy số 2 sẽ phát điện vào giữa tháng 12/2025, bảo đảm tiến độ hoàn thành toàn bộ dự án trong năm nay. Khi đó, cả hai tổ máy với công suất 480 MW sẽ đồng loạt bổ sung nguồn điện lớn, đóng góp khoảng 488 – 490 triệu kWh/năm, tăng khả năng phủ đỉnh và giảm áp lực cho hệ thống điện quốc gia.

Cam kết “An toàn – Chất lượng – Tiến độ”

Để đáp ứng khối lượng công việc khổng lồ trong điều kiện thi công phức tạp, LILAMA 10 đã huy động khoảng 500 kỹ sư và công nhân, cùng hệ thống máy móc hiện đại, tổ chức làm việc liên tục ba ca mỗi ngày.



Công tác an toàn lao động được đặt lên hàng đầu. Hàng ngày, Ban quản lý đều phổ biến quy định, giám sát hiện trường, nhắc nhở công nhân chấp hành nghiêm ngặt biện pháp bảo đảm an toàn. Nhờ đó, trong suốt quá trình thi công, không xảy ra sự cố nghiêm trọng nào.

Kỹ sư Trương Công Hùng, phụ trách giám sát an toàn, chia sẻ: “Chúng tôi luôn xác định an toàn là yếu tố số một. Mỗi người lao động đều ý thức rõ tầm quan trọng của dự án. Bất kỳ công đoạn nào, dù nhỏ nhất, cũng phải được thực hiện theo đúng quy trình. Chỉ có như vậy mới đảm bảo tiến độ và sức khỏe cho toàn bộ đội ngũ”.

Chính phương châm “An toàn – Chất lượng – Tiến độ” đã giúp LILAMA 10 xây dựng được uy tín bền vững trong lĩnh vực lắp đặt cơ khí – điện cho các công trình trọng điểm quốc gia. Thành công tại Thủy điện Hòa Bình Mở rộng tiếp tục khẳng định bản lĩnh và năng lực của doanh nghiệp.



Chủ tịch HĐQT LILAMA 10 - Ông Đặng Văn Long (thứ 4 từ trái qua) thăm và chúc mừng cán bộ, công nhân viên LILAMA 10 tại dự án

Việc Tổ máy số 1 của Thủy điện Hòa Bình mở rộng hòa lưới điện đúng dịp kỷ niệm 80 năm Cách mạng Tháng Tám và Quốc khánh 2/9 mang ý nghĩa đặc biệt. Đây không chỉ là món quà tinh thần chào mừng ngày lễ trọng đại, mà còn là biểu tượng cho nỗ lực, trí tuệ và quyết tâm của đội ngũ cán bộ, công nhân ngành năng lượng, trong đó LILAMA 10 là đại diện tiêu biểu.

Sự kiện này cũng chứng minh rằng các doanh nghiệp cơ khí – lắp máy Việt Nam hoàn toàn có thể làm chủ những dự án phức tạp, quy mô lớn, thay vì phụ thuộc vào các nhà thầu nước ngoài. Quan trọng hơn, thành công này còn mở ra cơ hội để các doanh nghiệp Việt, điển hình là LILAMA 10, tiếp tục tham gia vào những dự án năng lượng trọng điểm trong tương lai. Đây là minh chứng rõ nét cho việc Việt Nam ngày càng tự chủ hơn trong lĩnh vực năng lượng – một yếu tố then chốt để bảo đảm phát triển bền vững. ❖

PV