

# 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 chuyên gia 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: <sup>1</sup>Cơ khí Chế tạo máy, <sup>2</sup>Cơ khí Quốc phòng, <sup>3</sup>Cơ khí Giao thông, <sup>4</sup>Cơ khí Nông-lâm nghiệp, <sup>5</sup>Cơ khí Xây dựng, <sup>6</sup>Cơ khí Thủy sản, <sup>7</sup>Cơ khí Địa chất, <sup>8</sup>Cơ khí Hóa chất, <sup>9</sup>Cơ khí Bảo quản chế biến nông lâm thủy sản, <sup>10</sup>Cơ khí Động cơ đốt trong, <sup>11</sup>Cơ khí Ô tô - Máy kéo, <sup>12</sup>Cơ khí Máy thủy khí, <sup>13</sup>Cơ khí Công nghệ nhiệt lạnh, <sup>14</sup>Cơ khí máy năng lượng, <sup>15</sup>Cơ khí Công nghệ dệt, <sup>16</sup>Cơ khí Công nghệ cắt may, <sup>17</sup>Cơ khí Co-điện tử, <sup>18</sup>Cơ khí Kỹ thuật hệ thống công nghiệp, <sup>19</sup>Cơ khí đào tạo nguồn nhân lực và nghiên cứu chuyên gia.

## 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 tiêu 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. Trọng 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), Mai Dịch, Cầu Giấy, Hà Nội

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

**Email:** Tockvn.bbkh@gmail.com \* **Website:** cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

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

**TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM**, Số 326, tháng 3 năm 2025

**cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn**

**TỔNG BIÊN TẬP**  
**HÀ DUY KHÁNH**

**PHÓ TỔNG BIÊN TẬP**  
**ĐẶNG VĂN LONG**

**HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP**

TS. **ĐỖ HỮU 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 BÀ**  
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**

\*Tạp chí Cơ khí Việt Nam:  
- In tại Công ty Cổ phần In Khoa học Công nghệ Hà Nội  
- Khuôn khổ 20,5cm x 28,5cm  
- 48 trang  
- Xuất bản 60.000 đồng/quyển Tạp chí

**TẠP CHÍ**

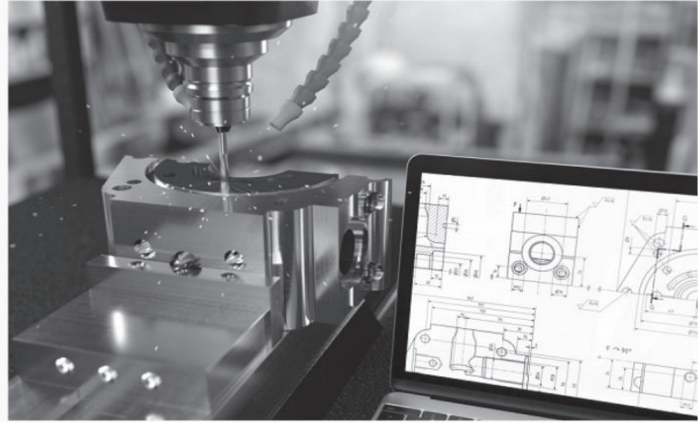


ISSN 2615 - 9910 (bản in)  
ISSN 2815 - 5505 (online)

**CƠ KHÍ**  
**VIỆT NAM**  
VIETNAM MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL

CƠ QUAN CỦA TỔNG HỘI CƠ KHÍ VIỆT NAM

• <http://cokhivietnam.vn/> / [tapchicokhi.com.vn](http://tapchicokhi.com.vn)



- ❖ Nghiên cứu mô phỏng và chế tạo mô hình hệ thống gạt mưa tự động trên ô tô sử dụng phần mềm Proteus và Arduino
- ❖ Phân tích đặc tính cháy động cơ diesel khi thiết lập cơ chế cháy do nén kết hợp hỗn hợp hòa trộn trước PCCI
- ❖ Phân loại mô hình sấy và ứng dụng mô hình bán thực nghiệm trong mô hình hóa quá trình và thiết bị sấy

Số 326, tháng 3 năm 2025

Tạp chí Cơ khí Việt Nam phát hành ngày 20 tháng 3 năm 2025

### TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM

Số 4 Phạm Văn Đồng (trong Viện Nghiên cứu Cơ khí), P. Mai Dịch, Cầu Giấy, Hà Nội

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

**Email:** [tckcvietnam@gmail.com](mailto:tckcvietnam@gmail.com)

**Website:** [cokhivietnam.vn/](http://cokhivietnam.vn/) / [tapchicokhi.com.vn](http://tapchicokhi.com.vn)

\*\*\*

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

### Văn 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 4, quận Gò Vấp,  
TP. Hồ Chí Minh  
**Điện thoại:** 0913 921 407  
**Email:** [tckc.tpchem@gmail.com](mailto:tckc.tpchem@gmail.com)

#### 2. Tại tỉnh Quảng Ninh:

- TS. **Hoàng Minh Thuận**  
Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng,  
Liên Phường, Phường Đông, Uông Bí, Quảng Ninh  
**Điện thoại:** 0904 116 189  
**Email:** [minhthuan.teckvn@gmail.com](mailto:minhthuan.teckvn@gmail.com)

#### 3. Tại Thái Nguyên:

- GS, TS. **Vũ Ngọc Pi**  
Số 234 Phú Xá, TP. Thái Nguyên, tỉnh Thái Nguyên  
**Điện thoại:** 0974 905 578  
**Email:** [vungocpi@tnut.edu.vn](mailto: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 14, Quận 10,  
TP. Hồ Chí Minh.  
**Điện thoại:** 0913 603 264  
**Email:** [nhluc@hcmut.edu.vn](mailto:nhluc@hcmut.edu.vn)

### Phòng viên thường trú:

#### 1. Tại Hải Phòng:

- Lê Thế Hiệp  
**Điện thoại:** 0913 063 747  
**Email:** [dai dienteck@gmail.com](mailto:dai dienteck@gmail.com)

**NGHIÊN CỨU – TRAO ĐỔI (5 – 44)**

1. <b>Nguyễn Văn Hào:</b> Ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính đến độ cứng và tổ chức tế vi của lớp phủ Deloro 60 (Ni) trên nền thép SUS440C sử dụng công nghệ phun phủ Laser cladding.....	05
2. <b>Nguyễn Tường Vi, Đinh Văn Phương, Vũ Thị Phụng:</b> Nghiên cứu mô phỏng và chế tạo mô hình hệ thống gạt mưa tự động trên ô tô sử dụng phần mềm Proteus và Arduino.....	12
3. <b>Nguyễn Cao Văn, Khương Thị Hà:</b> Phân tích đặc tính cháy động cơ diesel khi thiết lập cơ chế cháy do nén kết hợp hỗn hợp hòa trộn trước PCCI.....	17
4. <b>Nguyễn Thị Thùy Dung:</b> Phân loại mô hình sấy và ứng dụng mô hình bán thực nghiệm trong mô hình hóa quá trình và thiết bị sấy.....	24
5. TS. <b>Nguyễn Hữu Tú:</b> Nghiên cứu dao động riêng của khung nhà thép.....	33
6. <b>Do Thi Tam, Le Duy Minh, Vu Ngọc Pi, Le Thu Quy, Tran Thi Phuong Thao:</b> Design and manufacturing of ultrasonic vibration amplitude measuring device using digital micrometer....	40

**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 326, THÁNG 3 NĂM 2025**

---

<b>TT</b>	<b>HỌC HÀM, HỌC VỊ; HỌ VÀ TÊN</b>	<b>ĐƠN VỊ CÔNG TÁC</b>
1	PGS,TS. <b>Vũ Huy Lâm</b>	Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
2	TS. <b>Phạm Văn Liệu</b>	Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
3	PGS,TS. <b>Hà Minh Hùng</b>	Viện Phát triển Kỹ thuật Công nghệ tiên tiến (IDAT)
4	PGS,TS. <b>Nguyễn Thành Công</b>	Trường Đại học Giao thông Vận tải
5	TS. <b>Nguyễn Thìn Quỳnh</b>	
6	TS. <b>Khuông Thị Hà</b>	
7	PGS,TS. <b>Lê Kiều Hiệp</b>	Viện Công nghệ Năng lượng, Đại học Bách Khoa Hà Nội
8	TS. <b>Nguyễn Văn Trang</b>	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên

# ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ CHÍNH ĐẾN ĐỘ CỨNG VÀ TỔ CHỨC TẾ VI CỦA LỚP PHỦ DELORO 60 (Ni) TRÊN NỀN THÉP SUS440C SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ PHUN PHỦ LASER CLADDING

EFFECTS OF MAIN PARAMETERS TO HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF DELORO 60 (Ni) LAYERS ON SUS440C SUBSTRACT BY LASER CLADDING

Nguyễn Văn Hào

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

Email: haonv@utc.edu.vn

## TÓM TẮT

Lắng đọng kim loại bằng laser (LMD) là một trong những quy trình sản xuất trong các ngành công nghiệp, được sử dụng để nâng cao cơ tính của các chi tiết máy bên cạnh việc sản xuất và sửa chữa các chi tiết quan trọng trong kỹ thuật.

Để cải thiện độ cứng và khả năng chống mài mòn của thép, lớp phủ hợp kim Deloro 60 đã được phủ trên bề mặt thép SUS440C bằng công nghệ laser cladding. Trong nghiên cứu này, tác giả đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính đến khả năng chống mài mòn của lớp phủ Deloro 60 (Ni) thông qua độ cứng và tổ chức tế vi của lớp phủ trên nền thép SUS440C.

Kết quả cho thấy trong các thông số công nghệ khảo sát, lưu lượng cấp bột là thông số có ảnh hưởng nhiều nhất đến độ cứng của lớp phủ với 60,47%. Độ cứng đạt được cao nhất có thể là 962HV khi phủ với chế độ công suất đầu phun là 2300W, tốc độ quét 900 mm/phút và lưu lượng cấp bột 25g/phút. Tổ chức tế vi của lớp phủ bao gồm các thành phần cacbit phân bố trên nền dung dịch rắn Ni ( $\gamma$ -Austenite) với kích thước nhỏ và tương đối đồng nhất giúp cho lớp phủ đạt được độ cứng cao và khả năng chống mài mòn tốt.

**Từ khóa:** Lắng đọng kim loại bằng laser; Độ cứng; Khả năng chống mài mòn; Tổ chức tế vi.

## ABSTRACT

Laser metal deposition (LMD) is one of the manufacturing processes in the industries, which is used to enhance the properties of components besides producing and repairing important engineering components.

To improve the hardness and wear resistance of steel, the Deloro 60 layer was coatings on the surface of SUS440C steel by laser cladding. In this study, the effects of main parameters to wear resistance ability of Deloro 60 through hardness and microstructure of layer on SUS440C substract were researched.

*The results show that among the technological parameters surveyed, powder feed flow rate is the parameter that has the most influence on the hardness of the coating with 60.47%. The highest possible hardness is 962.72HV when coating with nozzle power of 2300W, scanning speed of 900 mm/min and powder flow of 25g/min. The microstructure of the coating includes carbide components distributed on a solid solution base of Ni ( $\gamma$ -Austenite) with small and relatively uniform size, helping the coating achieve high hardness and good abrasion resistance.*

**Keywords:** *Laser metal deposition; Hardness; Wear resistance; Microstructure.*

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong nhiều trường hợp quan trọng khi không có chi tiết dự trữ, thay thế mới thì chi tiết hỏng cần được sửa chữa phục hồi chức năng để đảm bảo được các chỉ tiêu về kinh tế, kỹ thuật của hệ thống [1].

Chi tiết phục hồi thường rẻ hơn rất nhiều so với chi tiết mới, thường chiếm khoảng 35÷60% giá thành so với chi tiết mua mới. Đặc biệt là đối với các chi tiết có kết cấu phức tạp, vật liệu có cơ tính cao, đắt tiền thì việc nếu phục hồi được sẽ đạt được hiệu quả kinh tế cao hơn rất nhiều so với mua hoặc chế tạo chi tiết mới. Hiện nay có nhiều phương pháp phục hồi chi tiết hư hỏng như: hàn đắp, phun phủ nhiệt.... Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất của các phương pháp phục hồi chi tiết truyền thống là vùng liên kết giữa chi tiết nền và phần phục hồi thường có cơ tính kém, dễ xuất hiện khuyết tật, lực liên kết vật liệu kém, tổ chức vật liệu giữa phần phục hồi và nền chi tiết không đồng nhất dẫn đến chi tiết sau khi được phục hồi không đạt được những yêu cầu về cơ tính như chi tiết ban đầu [2-5]. Bài báo nghiên cứu một phương pháp mới để phục hồi hư hỏng của chi tiết sử dụng công nghệ tạo hình bằng chùm tia laser (Phun phủ laser bột – Laser cladding). Công nghệ này đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực với mục đích chính như xử lý bề mặt, phục hồi chi tiết máy, in 3D... ứng dụng trong lĩnh vực hàng không vũ trụ, công

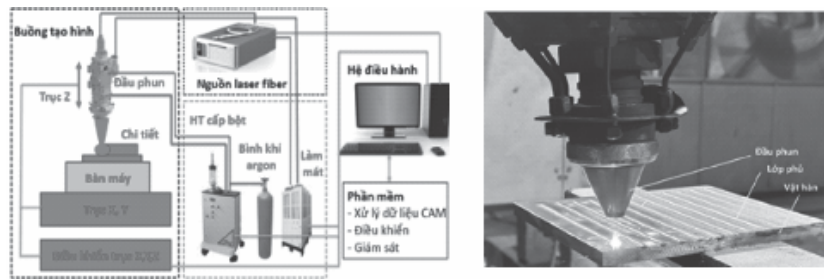
ng nghiệp ô tô, tàu thủy, quân sự, y học [6-11].

Vật liệu hợp kim thép không gỉ SUS440C là loại vật liệu được sử dụng nhiều trong ngành công nghiệp nhựa. Dựa trên nhu cầu thực tế và các nghiên cứu nói trên, tác giả tiến hành nghiên cứu tính toán ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính (Công suất nguồn laser P, tốc độ quét V và lưu lượng cấp bột  $M_p$ ) đến độ cứng và tổ chức tế vi của lớp phủ Deloro 60 (Ni) trên nền thép SUS440C sử dụng công nghệ phun phủ laser cladding là cơ sở cho việc phục hồi và chế tạo chi tiết trục vít trong máy đùn nhựa, là một chi tiết máy rất hay bị mài mòn và cần phục hồi.

## 2. VẬT LIỆU THÍ NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Thiết bị và vật liệu nghiên cứu

Thí nghiệm được thực hiện tại Công ty TNHH Thương mại và Công nghiệp Phương Đông. Thiết bị thí nghiệm là hệ thống bao gồm hệ thống bàn máy có kích thước (3500x1400x1600 mm), hệ thống laser có công suất 3500W, hệ thống chuyển động CNC 3 trục, hệ thống cấp bột tự động, bộ phận làm mát và khí Argon bảo vệ, đầu laser cấp bột đồng trục liên tục. Sơ đồ nguyên lý và thiết bị thể hiện trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống máy Laser cladding và hình ảnh quá trình phun phủ

Vật liệu thí nghiệm: Vật liệu nền là thép SUS440C dạng tấm, có kích thước 200x150x10 mm. Trước khi phun phủ, tấm nền được làm sạch và mài nhằm loại bỏ các chất bẩn và lớp oxit bề mặt. Để loại bỏ ảnh hưởng của độ ẩm, vật liệu nền được sấy khô ở nhiệt độ 80°C trong 10 phút.

Bảng 1. Thành phần hoá học vật liệu nền SUS440C

Thành phần	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)
Hàm lượng	0,95÷1,2	≤ 1	≤ 1	≤ 1	16÷18	≤ 0,75	≤ 0,04	≤ 0,03

Vật liệu bồi đắp được sử dụng là bột hợp kim Deloro 60 gốc niken có độ cứng và khả năng chống mài mòn cao. Bột phủ Deloro 60 có thành phần hóa học được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hoá học chính của bột phủ hợp kim Deloro 60

Ni (%)	Cr (%)	Si (%)	Fe (%)	C (%)	B (%)	Độ cứng (HRC)	Tỉ trọng (g/cm <sup>3</sup> )	Khoảng nhiệt độ nóng chảy (°C)
Cơ bản	14÷15	2,0÷4,5	3÷5	0,7	3,2	56÷64	7,8	906÷1081

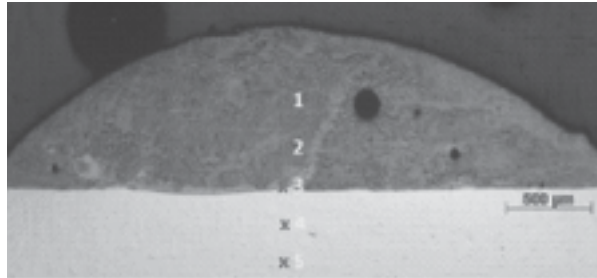
## 2.2. Phương pháp thực nghiệm

Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi để nghiên cứu ảnh hưởng của 3 thông số công nghệ ứng với 3 mức biến đổi:

Bảng 3. Các thông số công nghệ chính và các mức thay đổi

Thông số	Các mức		
	Mức 1	Mức 2	Mức 3
Công suất Laser P (W)	2100	2300	2500
Tốc độ quét đầu phun V (mm/phút)	900	1000	1100
Lưu lượng cấp bột M <sub>p</sub> (g/phút)	15	20	25

Đối với quy hoạch Taguchi, ta chọn ma trận quy hoạch trực giao L9 với  $N = 3^{3-1} = 9$  thí nghiệm, mỗi thí nghiệm lặp lại 2 lần. Mỗi mẫu sau thí nghiệm sẽ được đo độ cứng tại 5 điểm phân biệt (hình 2).



Hình 2. Sơ đồ vị trí đo độ cứng tại các vùng của liên kết lớp phủ

Tiến hành đo độ cứng tại các điểm theo hướng từ lớp phủ đến vật liệu nền được thể hiện trên sơ đồ hình 2. Các số liệu thực nghiệm thu được sẽ được phân tích nhằm tìm ra chế độ công nghệ tối ưu cho quá trình phun phủ.

## 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

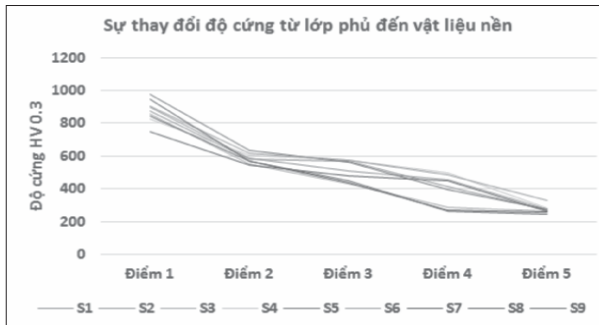
### 3.1. Kết quả độ cứng các mẫu nhận được

Bảng 4. Các kết quả đo độ cứng tại các điểm của các mẫu thí nghiệm

Nhóm	P (W)	V (mm/phút)	$M_p$ (g/phút)	Nhân tố mã hoá			Độ cứng trung bình ( $HV_{0.3}$ )				
				$x_1$	$x_2$	$x_3$	Điểm 1	Điểm 2	Điểm 3	Điểm 4	Điểm 5
S1	2100	900	15	1	1	1	871,8	579,4	569,6	414,7	272,1
S2	2100	1000	20	1	2	2	897,5	584,7	508,7	457,0	277,0
S3	2100	1100	25	1	3	3	858,8	553,2	433,8	289,7	265,1
S4	2300	900	20	2	1	2	824,0	605,9	575,8	496,8	280,1
S5	2300	1000	25	2	2	3	973,0	634,6	560,6	395,7	277,1
S6	2300	1100	15	2	3	1	904,8	618,5	575,2	486,8	330,0
S7	2500	900	25	3	1	3	948,7	566,2	435,8	270,0	257,2
S8	2500	1000	15	3	2	1	748,9	545,6	479,6	449,8	265,9
S9	2500	1100	20	3	3	2	843,0	571,1	446,0	262,8	247,3



3.2. Độ cứng tế vi của liên kết phủ



Hình 3. Sự thay đổi độ cứng tế vi HV của các nhóm mẫu phủ đơn lớp

Hình 3 cho thấy sự thay đổi độ cứng tế vi của 9 nhóm mẫu phủ một lớp theo hướng từ lớp phủ đến nền thép SUS440C trong các thí nghiệm. Có thể thấy độ cứng của lớp phủ cao hơn nhiều độ cứng của lớp nền ở cả 9 nhóm mẫu. Độ cứng lớp phủ khảo sát nằm trong khoảng (748÷973HV) tương ứng với (61÷65HRC), cao hơn so với độ cứng của nền (khoảng 247÷330HV).

3.3. Xác định tỷ số nhiễu

Theo phương pháp Taguchi, lựa chọn theo tiêu chí để độ cứng đạt được cao nhất có thể thì tỷ số nhiễu được xác định theo công thức:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{u=1}^u \frac{1}{y_u^2} \right); i = 1...9 \quad (1)$$

Bảng 5. Kết quả tỷ số nhiễu.

TT	Ảnh hưởng của P, M <sub>p</sub> , V đến độ cứng	
	y <sub>i</sub>	S/N
1	871,8	58,81
2	897,5	59,06
3	858,8	58,68
4	824,0	58,32

5	973,0	59,76
6	904,8	59,13
7	948,7	59,54
8	748,9	57,49
9	843,0	58,52

3.4. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ cứng

Dựa trên kết quả tính tỷ số nhiễu, ta lập bảng phân tích, tính giá trị trung bình tỷ số nhiễu cho mỗi yếu tố ở các mức khác nhau.

Bảng 6. Bảng phân tích S/N cho độ cứng

	P	V	M <sub>p</sub>
1	58,85	58,89	58,48
2	59,07	58,77	58,63
3	58,52	58,77	59,33
Mean (m)	58,81	58,81	58,81
Max	59,07	58,89	59,33
Max (m)	0,26	0,08	0,52
% ảnh hưởng	30,23	9,3	60,47

Dựa vào kết quả thí nghiệm, xác định được mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ cứng được xếp theo thứ tự giảm dần: Lưu lượng cấp bột chiếm: 60,47%; Công suất đầu phun: 30,23%; Tốc độ quét: 9,3%.

Độ cứng lớn nhất đạt được khi giá trị của các biến ở mức có S/N lớn nhất. Theo bảng 6 và hình 4 đó là bộ thông số P2V1M3, nghĩa là P = 2300W, V = 900 mm/phút và M<sub>p</sub> = 25g/phút.

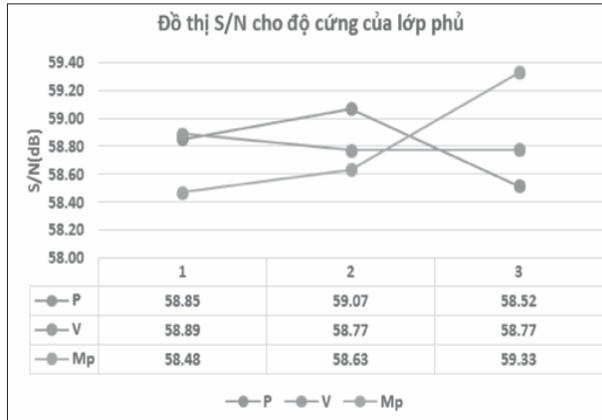
- Giá trị S/N tối ưu:

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^3 (\eta_i - \eta_m) = \left( \sum_{i=1}^3 \eta_i \right) - \eta_m \quad (2)$$

Trong đó:  $\eta_m$  - Giá trị S/N trung bình chung,  $\eta_i$  - Giá trị S/N ứng với tham số thứ  $i$ .

Theo bảng 6,  $\eta_m = \text{Mean}(S/N) = 58,81$ ; các giá trị  $\eta_i$  lần lượt là 59,07; 58,89 và 59,33. Vậy:

$$\eta_{opt} = (59,07 + 58,89 + 59,33) - 2.58,81 = 59,67.$$



Hình 4. Đồ thị đáp ứng S/N của các yếu tố theo độ cứng

- Độ cứng lớn nhất:

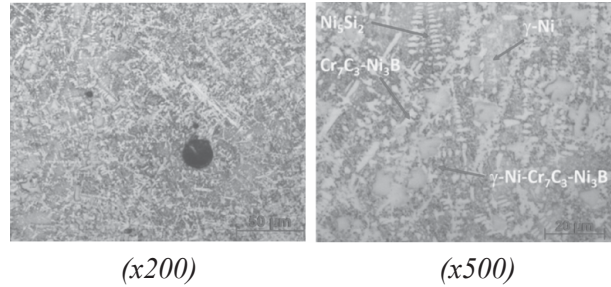
$$\eta_{max} = 10^{(\eta_{opt}/20)} = 10^{(59,67/20)} = 962,72 \text{ (HV)}$$

Chế độ phủ tối ưu là P2V1M3 (P = 2300W, V = 900 mm/phút và  $M_p = 25\text{g/phút}$ ). Với chế độ này nhận được độ cứng là 962,72 HV.

### 3.5. Tổ chức tế vi của lớp phủ

Cấu trúc tế vi của lớp phủ đã được khảo sát và được thể hiện trên hình 5.

Hợp kim Deloro có gốc niken với các chất bổ sung điển hình là Cr, C, B, Fe và Si. Độ cứng cao đến từ cấu trúc vi mô rất phức tạp bao gồm dung dịch rắn Ni, các pha cứng  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Cr}_5\text{B}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ , CrB và các cacbua Cr khác nhau.



Hình 5. Tổ chức tế vi của lớp phủ ở độ phóng đại x200 và x500

Hình thể hiện tổ chức tế vi của vùng lớp phủ bao gồm cacbit tiết pha trên nền dung dịch rắn Ni ( $\gamma$ -Austenite) có dạng nhánh cây. Sự có mặt của các pha cứng  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Ni}_5\text{Si}_2$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$  giúp lớp phủ có độ cứng cao và khả năng chống mài mòn tốt.

### 4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã đánh giá được ảnh hưởng của 3 thông số công nghệ chính đến độ cứng tại các vùng của liên kết phủ Deloro 60 bằng công nghệ laser cladding trên nền thép SUS440C, kết quả nghiên cứu cho thấy:

(1) Các giá trị thông số công nghệ khác nhau có ảnh hưởng khác nhau đến độ cứng của lớp phủ. Trong 3 thông số công nghệ chính là Công suất đầu phun P, tốc độ quét V và lưu lượng cấp bột chiếm thì lưu lượng cấp bột  $M_p$  có ảnh hưởng lớn nhất với 60,47%, sau đó là công suất đầu phun chiếm 30,23% và tốc độ quét chiếm 9,3%.

(2) Bằng thực nghiệm theo phương pháp Taguchi và tính toán thì chế độ phun phủ tối ưu tương ứng với bột phủ và vật liệu nền đã chọn là bộ thông số P2V1M3, nghĩa là P = 2300W, V = 900 mm/phút và  $M_p = 25\text{g/phút}$ . Độ cứng cao nhất có thể đạt được với chế độ này là 962,72 HV.

(3) Phân tích cấu trúc tế vi cho thấy tổ chức tế vi của vùng lớp phủ bao gồm cacbit tiết pha trên nền dung dịch rắn Ni ( $\gamma$ -Austenite) có dạng nhánh cây. Sự có mặt của các pha cứng  $Cr_7C_3$ ,  $Ni_5Si_2$ ,  $Ni_3B$  giúp lớp phủ có độ cứng cao và khả năng chống mài mòn tốt.

**Lời cảm ơn:**

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải trong đề tài cấp trường mã số T2024-CK-001. ❖

Ngày nhận bài: **10/02/2025**

Ngày phản biện: **24/02/2025**

**Tài liệu tham khảo:**

- [1]. Nguyễn Trọng Hiệp, “*Chi tiết máy*”, NXB. Giáo dục, 2010, trang 40-50.
- [2]. Nguyễn Thúc Hà, “*Công nghệ Hàn*”, NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2010, trang 30-34.
- [3]. Nguyễn Đức Thắng, “*Đảm bảo chất lượng hàn*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2009, trang 7-10.
- [4]. Trần Minh Hoàng, “*Công nghệ mạ điện*”, NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 1998, trang 70-72.
- [5]. Nguyễn Văn Thông, “*Công nghệ phun phủ*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2012, trang 44-46.
- [6]. Fehim Findik, “*Laser cladding and applications*”. Sustainable Engineering and Innovation, Vol. 5, No. 1, February 2023, pp.1-14.
- [7]. Simone Zanzarin, “*Laser Cladding with metallic powders*”. University of Trento-Italy, November 2015.
- [8]. Chua C. K., Leong K. F., and Lim C. S., “*Rapid prototyping Principle and Applications*”. World Scientific, Singapore, 2003, pp. 178.
- [9]. Y. P. Kathuria, “*Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry*”. Surface and Coatings Technology, 132 (2000), 262-269.
- [10]. Lei Wang and Shuai Wang, “*Effects of precipitated phases on the crack propagation behaviour of a Ni-based superalloy*”. International Journal of Fatigue, 62(2014), 210-216.
- [11]. Hao Nanhai, Lu Wei and Zuo TieZhuan, “*Thermal mechanical coupling FAE of temperature field in Laser cladding process*”. Surface Technology, 6(2004), 10-14.

# NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG VÀ CHẾ TẠO MÔ HÌNH HỆ THỐNG GẠT MƯA TỰ ĐỘNG TRÊN Ô TÔ SỬ DỤNG PHẦN MỀM PROTEUS VÀ ARDUINO

RESEARCH ON SIMULATION AND MANUFACTURE OF MODEL OF AUTOMATIC WIPER SYSTEM ON CARS USING PROTEUS AND ARDUINO SOFTWARE

Nguyễn Tường Vi, Đinh Văn Phương, Vũ Thị Phương  
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

## TÓM TẮT

*Bài báo này trình bày kết quả ứng dụng phần mềm Proteus để mô phỏng hệ thống gạt mưa tự động trên ô tô, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thực nghiệm thiết kế, chế tạo mô hình sử dụng nền tảng mã nguồn mở Arduino. Mô phỏng có sử dụng phần mềm Arduino IDE lập trình cho vi điều khiển Atmega328, màn hình hiển thị lượng mưa LCD 16x2 và các linh kiện khác. Kết quả nghiên cứu cho thấy, mô hình hệ thống gạt mưa tự động hoạt động với tốc độ thay đổi theo lượng mưa và phù hợp với hoạt động thực tế của hệ thống này trên các ô tô hiện đại.*

**Từ khóa:** *Proteus; Hệ thống gạt mưa; Arduino.*

## ABSTRACT

*This paper presents the results of applying Proteus software to simulate the automatic wiper system on cars. In this study, the authors experimentally designed and manufactured a model using the Arduino open source platform. The simulation uses Arduino IDE software to program the Atmega328 microcontroller, 16x2 LCD rainfall display screen and other components. The research results show that the automatic wiper system model operates at a speed that varies with the rainfall and is consistent with the actual operation of this system on modern cars.*

**Keywords:** *Proteus; Wiper system; Arduino.*

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, vấn đề tiện nghi trên ô tô là tiêu chí chính để đánh giá một chiếc xe hơi cao cấp. Hệ thống gạt mưa – rửa kính của ô tô là một bộ phận không thể thiếu khi xe vận hành trên đường, nhằm đảm bảo tính an toàn cho người và phương tiện khi tham gia giao thông. Xuất phát từ tình hình thực tế trên thế giới, bộ

điều khiển gạt nước tự động đã được nghiên cứu và phát triển khá thành công ở nước ngoài và được trang bị trên một số hãng xe lớn như BMW, Mercedes...

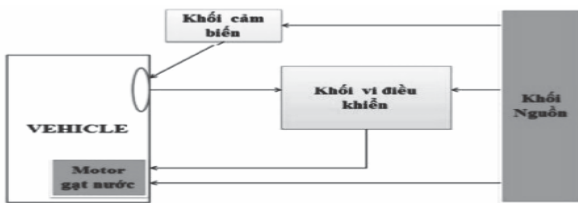
Tuy nhiên, nhiều xe trong nước vẫn trang bị hệ thống gạt nước mưa trên nguyên tắc chuyển đổi bật tắt bằng tay, chưa được trang bị hệ thống gạt nước và rửa kính tự động. Điều

này gây bất lợi cho người lái xe làm việc trong điều kiện thời tiết xấu (mưa, bão...), gây mất tập trung và ảnh hưởng đến việc lái xe an toàn.

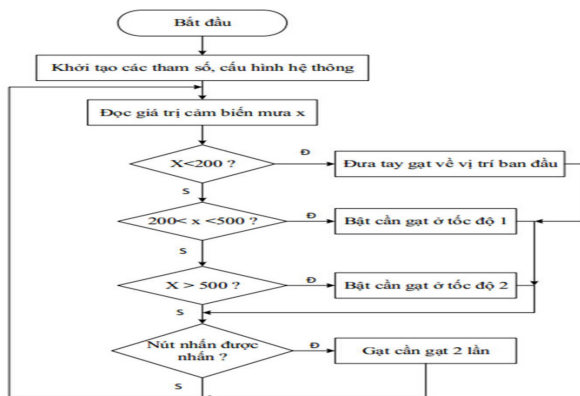
Đối với các nước phát triển, hệ thống gạt mưa tự động không còn xa lạ, nhưng để hiểu sâu và toàn diện về cấu tạo, nguyên lý làm việc và mạch điều khiển, vi điều khiển của hệ thống gạt mưa tự động trên ô tô nhằm nâng cao kiến thức kỹ năng cho sinh viên, có thể vận hành, bảo trì, bảo dưỡng và cải tiến hệ thống gạt mưa trên ô tô hiện nay, do đó bài báo này tập trung nghiên cứu mô phỏng và chế tạo mô hình hệ thống gạt mưa tự động với tốc độ gạt thay đổi theo lượng mưa và phù hợp với hoạt động thực tế của hệ thống này trên các ô tô hiện đại.

## 2. MÔ PHỎNG HỆ THỐNG GẠT MƯA TỰ ĐỘNG

### 2.1. Xây dựng sơ đồ khối hệ thống gạt mưa tự động



Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống gạt mưa tự động



Hình 2. Lưu đồ thuật toán hệ thống gạt mưa tự động

Sơ đồ khối hệ thống gạt nước tự động của hệ thống gạt nước mưa tự động (Hình 1) với chức năng các khối làm việc như sau:

- Khối nguồn (Power): Cung cấp điện áp ổn định cho tất cả các khối trong hệ thống, khối nguồn được sử dụng để ổn định và cấp điện áp 5V DC cho khối điều khiển (Arduino) và động cơ Servo DC cũng như cấp nguồn cho mạch hoạt động.

- Khối cảm biến (Cảm biến mưa): Khối này có nhiệm vụ lấy mẫu tín hiệu mưa và chuyển thành giá trị điện áp để đưa đến vi điều khiển để xử lý. Ở đề tài này, tác giả sử dụng cảm biến mưa để phát hiện khi trời có mưa và lưu lượng nước mưa.

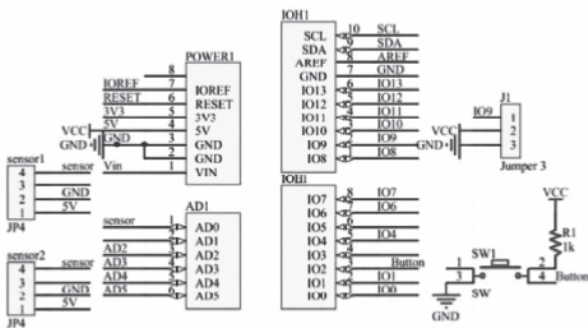
- Khối điều khiển: Khối này làm nhiệm vụ giao tiếp, nhận và xử lý dữ liệu từ cảm biến, điều khiển các thiết bị ngoại vi. Ở đây, khối điều khiển đóng vai trò rất quan trọng, nhận tín hiệu từ khối cảm biến và xử lý thông tin để đưa tín hiệu đến khối chấp hành (động cơ gạt nước). Động cơ gạt nước sử dụng động cơ Servo DC, động cơ này được nối với hệ thống cần gạt nước để gạt nước khi có mưa. Động cơ nhận tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển để từ đó hoạt động theo yêu cầu.

### 2.2. Lưu đồ thuật toán và nguyên lý điều khiển của của mạch gạt mưa tự động

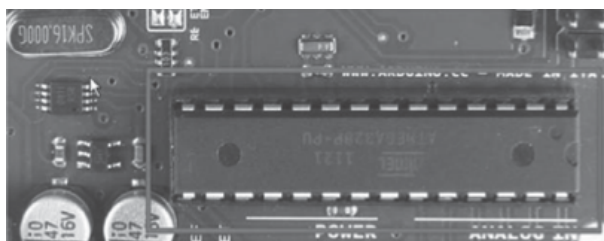
Ban đầu khi cấp nguồn cho mạch, vi điều khiển sẽ cấu hình các tham số và khởi động hệ thống. Vi điều khiển sẽ đọc tín hiệu cảm biến tại chân A0 (lượng mưa theo thang ADC 10 bit) so sánh với các ngưỡng nếu lượng mưa nhỏ < 200 thì động cơ không quay, nếu lượng mưa > 200 và nhỏ hơn 500 thì bật động cơ gạt nước hoạt động ở tốc độ 1, nếu lượng mưa lớn hơn 500 thì bật động cơ gạt nước ở tốc độ 2.

độ 2. Đồng thời, để khắc phục hiện tượng mưa sương hoặc sương mù mà lượng nước trên cảm biến quá nhỏ (<200), tác giả đã thêm một nút nhấn để khi trời mưa quá nhỏ thì ta có thể sử dụng nút nhấn để bật động cơ gạt nước, lúc này động cơ gạt nước gạt gián đoạn 2 lần trong 10 giây (Hình 2, 3).

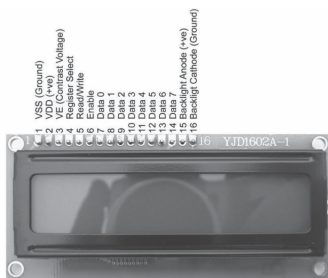
Thuật toán điều khiển (Hình 2) và chương trình điều khiển được thực hiện trên phần mềm CodeVisionAVR được viết bằng ngôn ngữ C++, chương trình này được biên dịch và nạp vào Atmega328 để điều khiển hệ thống.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý của mạch gạt mưa tự động



Hình 4. Vi điều khiển Atmega328



Hình 5. Màn hình hiển thị LCD

### 2.3. Mô phỏng mạch điều khiển

Sơ đồ mô phỏng mạch hệ thống gạt mưa tự động trên ô tô được thực hiện trên phần mềm Proteus [1, 2]. Hệ thống này sử dụng một số khối chính như: Vi điều khiển Atmega328, có 14 chân digital I/O, 6 chân đầu vào (input) analog, thạch anh dao động 16Mhz [3], cảm biến mưa, màn hình hiển thị LCD 16x2 [4].

Trong nghiên cứu này, vi điều khiển được chọn là Atmega328 (Hình 4), đây là dòng vi điều khiển 8 bit, các thông số chính của vi điều khiển Atmega328 được thể hiện trong bảng 1 [5].

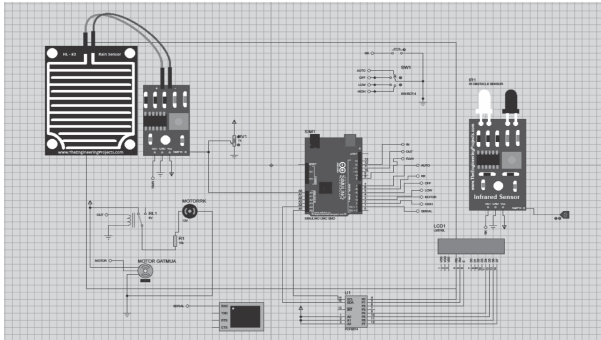
Bảng 1. Các thông số chính của vi điều khiển Atmega328 [5]

Thông số	Giá trị
Điện áp làm việc	4,5 ÷ 5,5V
Tần số làm việc	0 ÷ 16MHz
Số chân loại PDIP	40
Số chân I/O	32
Số kênh ADC 10 bit	8
Số kênh PWM	4
Số kênh time 8 bit	2
Số kênh time 16 bit	1
Bộ nhớ chương trình flash	16 K bytes
Bộ nhớ EEPROM	512 bytes
Bộ nhớ SRAM	1 K byte

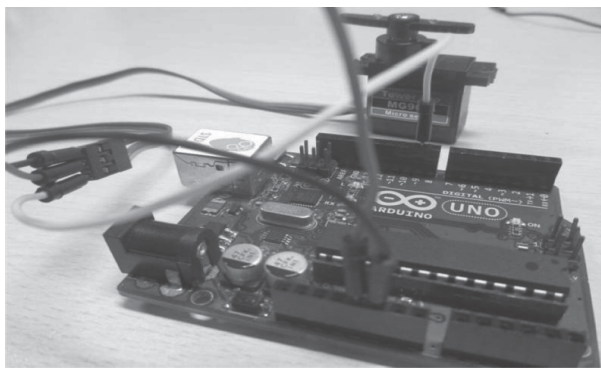
Để hiển thị lượng mưa, nhóm tác giả sử dụng màn hình hiển thị LCD 16x2 [4] (Hình 5), đây là loại màn hình hiển thị ký tự cho phép hiển thị thông tin trên 2 hàng, mỗi hàng hiển thị tối đa 16 ký tự.

### 3. MÔ PHỎNG VÀ CHẾ TẠO MÔ HÌNH HỆ THỐNG CHIẾU SÁNG TỰ ĐỘNG

#### 3.1. Kết quả mô phỏng



Hình 6. Kết quả mô phỏng trên Proteus



Hình 7. Kết nối giữa động cơ và Arduino

Mô phỏng được thực hiện với các thông số lượng mưa như sau:

Dưới 200 ứng với lượng mưa nhỏ (dưới 16 mm/24h); từ 200 đến 500 (từ 16 đến 50mm/24h); trên 500 (từ 51mm/24h trở lên). Kết quả mô phỏng của đề tài được thể hiện trên hình 6.

#### 3.2. Quy trình chế tạo và kết nối các khối chức năng trong hệ thống

##### 3.2.1. Quy trình chế tạo mô hình

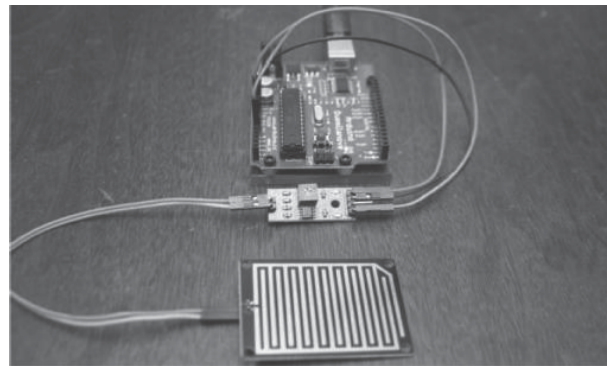
Quá trình chế tạo mô hình hệ thống

chiếu sáng tự động được thực hiện theo các bước sau:

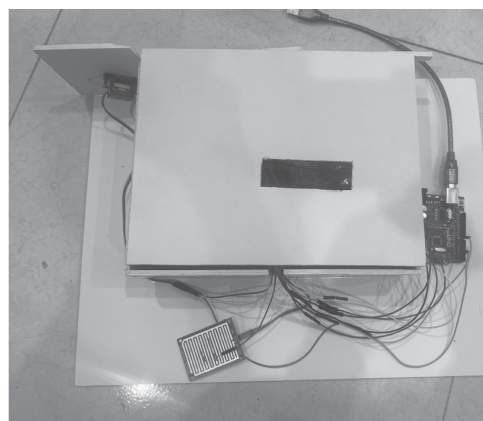
- Chuẩn bị linh kiện: Các linh kiện như Arduino, cảm biến mưa, khung giá nhựa, bo mạch, dây nối, nguồn;
- Kết nối các khối chức năng;
- Hoàn thiện mô hình.

##### 3.2.2. Kết nối động cơ Servo với Arduino

Động cơ Servo được sử dụng trong đề tài này là loại Tower Pro MG90S. Động cơ này quay được 180° (trái 90° và phải 90°). Ta kết nối dây vàng nối với PIN 9 hay các PIN PWM tương đương (những PIN có ký hiệu ~ ở trước), dây đỏ nối với nguồn 5V, dây đen nối vào chân âm (Hình 7).



Hình 8. Kết nối cảm biến mưa và Arduino



Hình 9. Hệ thống sau khi hoàn chỉnh



### 3.2.3. Kết nối cảm biến mưa với Arduino

Dựa vào chức năng sử dụng, ta có sơ đồ kết nối giữa cảm biến mưa và Arduino như sau: Chân VCC của cảm biến với chân 5V của Arduino; GND với GND và A0 với A0 (Hình 8).

### 3.2.4. Hoàn thiện mô hình

Thiết kế và gia công panel gắn thiết bị, thiết kế, chế tạo khung giá, lắp ráp mô hình, đi dây và vận hành mô hình. Mô hình hệ thống gạt mưa tự động được chế tạo thành công thể hiện trên Hình 9.

## 4. KẾT LUẬN

Đã mô phỏng thành công hệ thống gạt mưa tự động theo các tín hiệu lượng mưa khác nhau. Đồng thời xây dựng được thuật toán điều khiển và chương trình điều khiển bằng phần mềm CodevisionAVR.

Đã chế tạo thành công mô hình mô phỏng hệ thống gạt mưa tự động hoạt động theo các tín hiệu lượng mưa mô phỏng gồm: dưới 200 thì gạt 2 lần; từ 200 đến 500 thì gạt chậm; trên 500 thì gạt nhanh. ❖

Ngày nhận bài: **22/11/2024**

Ngày phản biện: **17/12/2024**

---

### Tài liệu tham khảo:

- [1]. Labcenter Electronics (2019), “*Proteus design suite getting started guide*”. Labcenter Electronics.
- [2]. Labcenter (2019), “*Proteus software*”. Truy cập ngày 26/04/2019, tại trang web <https://www.labcenter.com/>.
- [3]. Hitachi (2002), “*LCDFM016L*”. Hitachi.
- [4]. Steven F. Barrett, Daniel J. Pack (2008), “*Atmel AVR Microcontroller Primer: Programming and Interfacing*”. Morgan & Claypool.
- [5]. Atmel (2002), “*Atmega328 Microcontroller*”. Atmel.



# PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH CHÁY ĐỘNG CƠ DIESEL KHI THIẾT LẬP CƠ CHẾ CHÁY DO NÉN KẾT HỢP HỖ HỢP HÒA TRỘN TRƯỚC PCCI

ANALYSIS CHARACTERISTICS CUMBUSTION OF DIESEL ENGINE WHEN ESTABLISHING PREMIXED CHARGE COMPRESSION IGNITION (PCCI)

Nguyễn Cao Văn\*, Khương Thị Hà

Trường Đại học Giao thông Vận tải

\*Email: caovan87@utc.edu.vn

## TÓM TẮT

Trong bài báo này tiến hành thực nghiệm để đánh giá đặc tính cháy và sự phát thải trên động cơ diesel khi thiết lập cơ chế cháy do nén kết hợp hòa trộn trước. Để thiết lập cơ chế cháy PCCI, tác giả tiến hành thay đổi các tham số của vòi phun như: thời điểm phun, thời gian phun và áp suất phun. Kết quả cho thấy, tại tốc độ 2000 vòng/ph và 30% tải khi tăng góc phun sớm thì động cơ bắt đầu xuất hiện ngọn lửa lạnh, góc phun phù hợp là 45 độ trước khuỷu trước điểm chết trên và áp suất phun là 450 bar. Đồng thời, phát thải về độ khói, HC, CO có xu hướng giảm, NOx tăng khi tăng góc phun sớm. Kết quả bài báo có thể dự báo được thời điểm phun thích hợp cho động cơ diesel khi thiết lập cơ chế cháy PCCI.

**Từ khóa:** Combustion Model; Combustion Characteristic; PCCI; Net Heat Realese; Zezo – Dimention.

## ABSTRACT

This report describes an experimental investigation that evaluated the combustion characteristics and emissions of a diesel engine employing the Premixed Charge Compression Ignition (PCCI) method. The author establishes the PCCI combustion process by adjusting injector parameters such as injection timing, duration, and pressure. The results demonstrate that at 2000 rpm and 30% load, increasing the early injection angle causes cold flames to develop. The ideal injection angle is 45 degrees before top dead center, with a pressure of 450 bar. Smoke, HC, and CO emissions fall, NOx increases when early injection angle is increases. The results can help forecast the optimal injection timing for diesel engines using PCCI combustion.

**Keywords:** Combustion Model; Combustion Characteristic; PCCI; Net Heat Realese; Zezo – Dimention.



Quá trình phun nhiên liệu được điều khiển qua phần mềm INCA. Phần mềm này có thể thay đổi được các thông số của vòi phun như: thời điểm phun, khoảng thời gian phun và áp suất phun. Nhiên liệu thử nghiệm là diesel, tính chất vật lý và hóa học của nhiên liệu thử nghiệm theo TCVN 5689:2023.

Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật động cơ thử nghiệm

Thông số kỹ thuật	Động cơ Changchai 192FA
Đường kính xy lanh D, [mm]	92
Hành trình S, [mm]	76
Thể tích công tác $V_h$ , [cm <sup>3</sup> ]	504
Tỷ số nén $\epsilon$	19
Công suất định mức, [kW]	8.2
Tốc độ định mức, [vòng/phút]	3600

## 2.2. Phương pháp thực nghiệm

Phương pháp thử nghiệm được sử dụng ở đây là phương pháp thử nghiệm đối chứng giữa hai phương pháp tổ chức quá trình cháy cho động cơ diesel truyền thống và động cơ diesel cháy kiểu hỗn hợp hòa trộn trước một phần PCCI.

Các bước tiến hành thử nghiệm được thực hiện như sau:

Bước 1: Động cơ vận hành ở tốc độ 1400 (vg/ph) đến 2000 (vg/ph) với khoảng chia 400 (vg/ph); Giữ nguyên áp suất phun là 450 (bar) và lượng nhiên liệu cung cấp cho chu trình tương ứng với 30% tải.

Bước 2: Tại mức tải trọng trên, ta thay đổi góc phun sớm từ 35° đến 70° góc quay trục

khuyết trước điểm chết trên; Tiến hành đo áp suất quá trình cháy và các thông số phát thải của động cơ.

## 2.3. Cơ sở lý thuyết tính toán tốc độ tỏa nhiệt

Để tính toán tốc độ tỏa nhiệt hay quy luật cháy của nhiên liệu tại các thời điểm trong chu trình công tác của động cơ dựa trên phân tích đồ thị áp suất  $p = f(\alpha)$  một cách đơn giản nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết khi dựa trên mô hình nhiệt động một vùng. Trong mô hình này, nhiệt độ trong xy lanh được coi là như nhau tại mọi điểm. Viết phương trình nhiệt động thứ nhất cho môi chất trong xy lanh, ta có:

$$dQ = dU + pdV + dQ_m + \sum h_i \cdot dm_i \quad (2-1)$$

Trong đó:

- dQ: Nhiệt lượng do nhiên liệu cháy sinh ra;
- dU: Biến thiên nội năng do nhiệt độ khí thay đổi;
- pdV: Công làm dịch chuyển piston;
- $dQ_m$ : Nhiệt lượng truyền cho xy lanh;
- $h_i$  và  $dm_i$  là entanpi  $h'$  và khối lượng của khí vào hoặc ra khỏi các khe kẽ  $dm_{kk}$  giữa piston – xy lanh.

Ta có:

$$dU = d(mu) = m \cdot du + u \cdot dm = mc_v dT - u dm_{kk} \quad (2-2)$$

$$\sum h_i \cdot dm_i = h' \cdot dm_{kk} \quad (2-3)$$

$$dQ_m = Ah_c(T - T_w)dt = \frac{1}{\omega} Ah_c(T - T_w) \cdot d\alpha$$

Trong đó:

- $h_c$ : Hệ số truyền nhiệt từ khí thể có nhiệt độ T ra thành buồng cháy có nhiệt độ  $T_w$ , diện tích truyền nhiệt tức thời A;
- $\omega$ : Vận tốc góc trục khuỷu, rad/s.

Sử dụng phương trình trạng thái khí lý tưởng  $pV = mRT$ , vi phân hai vế và thế  $mdT$  vào phương trình (2-3) rồi thế vào phương trình (3-1), chú ý tính chất nhiệt động của khí lý tưởng:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Trong đó:

$$C_p = 1403.06 - 360.72 \left( \frac{10^3}{T} \right) + 182.24 \left( \frac{10^3}{T} \right)^2 - 10.72 \left( \frac{10^3}{T} \right)^3 \quad [6]$$

$$C_v = R - C_p$$

Ta có:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt} + (h' - u + c_v T) dm_{kk} + Ah_c (T - T_w) \quad (2-4)$$

Như vậy, khi đo được đường cong áp suất theo góc quay trục khuỷu, ta có thể tính toán được tốc độ tỏa nhiệt của nhiên liệu hoặc lượng nhiệt tỏa ra của nhiên liệu cháy trong xy lanh ở các thời điểm hoặc các vị trí góc quay trục khuỷu.

Đối với động cơ diesel, ta gọi  $Q_n = Q - Q_{in}$  là nhiệt của nhiên liệu cháy tỏa ra sau khi đã trừ đi phần nhiệt truyền cho thành buồng cháy. Bỏ qua ảnh hưởng của khe kẽ giữa piston-xy lanh (tức là không kể đến hiện tượng nén khí và thoát khí ra khỏi các khe kẽ) và bỏ qua enthanpi của nhiên liệu phun vào (tức là  $\sum h_f m_f = h_f m_f = 0$ ;  $h_f m_f$  là enthanpi và khối lượng nhiên liệu phun vào). Phương trình (2-4) được viết thành:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt} \quad (2-5)$$

Ta biến đổi (2-5) theo góc quay trục khuỷu:

$$\frac{dQ_n}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{dQ_n}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta}$$

Theo công thức trên thì ta nhận thấy rằng: xuất hiện biến thiên thể tích xy lanh theo góc quay trục khuỷu. Vì vậy, ta phải xác định

giá trị  $\frac{dV}{d\theta}$  như sau:

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} S(\theta) \quad (2-6)$$

Trong đó:

-  $V_c$ : Thể tích buồng cháy của động cơ ( $m^3$ );

-  $D$ : Đường kính xy lanh (m);

-  $S(\theta)$ : Giá trị chuyển vị của pít tông, tính từ thời điểm pít tông ở vị trí điểm chết trên (m).

Giá trị chuyển vị của pít tông tính từ điểm chết trên được xác định theo quy luật động học của cơ cấu khuỷu trục - thanh truyền theo công thức [6]:

$$S(\theta) = R[(1 - \cos \theta) + \frac{1}{\lambda}(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta})] \quad (2-7)$$

Trong đó:

-  $R$ : Bán kính quay của trục khuỷu (m).

-  $\lambda = \frac{R}{L}$ : Tỷ số kết cấu, là tỷ số giữa bán kính quay  $R$  của trục khuỷu và chiều dài thanh truyền  $L$ .

Do  $R = \frac{S}{2}$ , trong đó  $S$  là hành trình của pít tông, nên sau khi thay phương trình (2-7) vào phương trình (2.2), ta có:

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi D^2 S}{4} \frac{1}{2} [(1 - \cos \theta) + \frac{1}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta})] \quad (2-8)$$

Hay:

$$V(\theta) = V_c + \frac{V_h}{2} [(1 - \cos \theta) + \frac{1}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta})] \quad (2-9)$$

Trong đó,  $V_h$  là thể tích công tác của xy lanh ( $m^3$ ).

Đạo hàm phương trình (2-9) theo góc quay  $\varphi$  của trục khuỷu, ta có biểu thức vi phân biểu diễn tốc độ biến thiên của thể tích xy lanh động cơ theo góc quay  $\varphi$  của trục khuỷu.

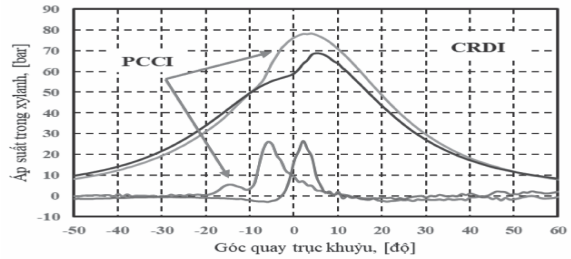
$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{V_h}{2} [\sin \theta + \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta}} \sin \theta \cos \theta] \quad (2-10)$$

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Đặc tính cháy

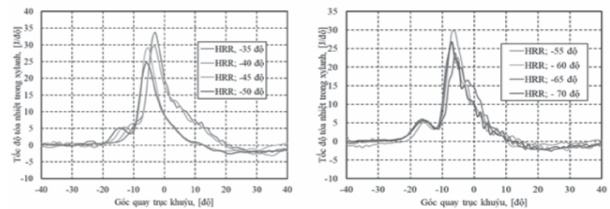
Để thiết lập quá trình cháy trên động cơ diesel cháy theo kiểu PCCI, tác giả đi phân tích đặc tính tốc độ tỏa nhiệt để nhận biết cơ chế cháy. Nếu khi thay đổi thời điểm phun mà đặc tính tốc độ tỏa nhiệt xuất hiện ngọn lửa lạnh, thì động cơ đang cháy theo cơ chế PCCI [7]. Việc phân biệt đặc tính cháy của động cơ diesel nguyên thủy và động cơ diesel cháy theo cơ chế PCCI được thể hiện ở hình 3.1.

Hình 3.1 là diễn biến áp suất trong xy lanh và tốc độ tỏa nhiệt của động cơ khi thay đổi góc phun ở 2000 vg/ph, 30% tải. Kết quả cho thấy khi phun sớm 45° góc trục khuỷu trước điểm chết trên, bắt đầu xuất hiện ngọn lửa lạnh.



Hình 3.1. Diễn biến áp suất trong xy lanh và tốc độ tỏa nhiệt của động cơ khi thiết lập PCCI so với động cơ nguyên thủy tại 2000 vg/ph, 30% tải

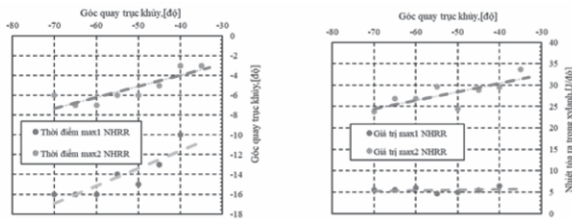
Tiến hành thử nghiệm tại các góc phun sớm khác nhau khi cố định 30% tải, tốc độ 2000 vòng/phút và áp suất phun 450 bar. Hình 3.2 thể hiện đặc tính cháy của động cơ diesel khi thay đổi thời điểm phun sớm từ 35° đến 70° góc quay trục khuỷu trước điểm chết trên. Nhóm nghiên cứu đánh giá và phân tích thời điểm xuất hiện ngọn lửa lạnh trong động cơ ảnh hưởng tới việc thiết lập cơ chế cháy PCCI.



Hình 3.2. Diễn biến tốc độ tỏa nhiệt của động cơ khi thay đổi góc phun tại 2000 vg/ph, 30% tải

STT	Góc phun sớm [độ]	Thời điểm HRR max-1 [độ]	Thời điểm HRR max-2 [độ]	Giá trị HRR max-1 [J/độ]	Giá trị HRR max-2 [J/độ]	Ghi chú
1	-35	-	-3	-	33.7	
2	-40	-10	-3	6.5	29.5	
3	-45	-13	-5	5.4	28.9	
4	-50	-15	-6	5	24.5	
5	-55	-14	-6	4.7	29.6	
6	-60	-16	-7	6	26.8	
7	-65	-16	-7	5.5	26.8	
8	-70	-16	-6	5.5	23.8	

Thời điểm cháy khi cháy theo cơ chế PCCI cũng diễn ra sớm hơn. Điều này là do nhiên liệu được phun sớm vào động cơ, sớm bị oxy hóa sâu sắc và quá trình cháy nhiệt độ thấp làm động cơ có tốc độ tăng áp suất tốt hơn động cơ nguyên bản.



Hình 3.3. Thời điểm bắt đầu cháy khi thay đổi góc phun tại 2000 vg/ph, 30% tải

Thời điểm bắt đầu cháy của nguồn lửa lạnh có xu hướng tăng dần khi tăng góc phun sớm và ít thay đổi khi góc phun sớm lớn hơn

45° góc quay trục khuỷu trước điểm chết trên, trong khi đó giá trị cực đại của nguồn lửa lạnh lại ít thay đổi (hình 3.3). Điều này là do khi phun sớm, hỗn hợp hình thành trước đồng đều hơn và phân tán đồng nhất trong xy lanh nên quá trình diễn ra ổn định. Tuy nhiên, khi tăng dần góc phun sớm thì tốc độ tỏa nhiệt của giai đoạn cháy chính lại diễn ra không ổn định. Nguyên nhân do nhiên liệu bám vào thành vách xy lanh khi nhiệt độ thành vách chưa đủ lớn cho nên quá trình cháy diễn ra không đồng thời.

3.2. Đặc tính phát thải

Để đánh giá đặc tính phát thải của động cơ khi thay đổi thời điểm phun, trong bài báo này, chúng tôi đánh giá đặc tính phát thải của động cơ tại 2000 vg/ph, nguyên bản và PCCI, tại 30% tải.

Bảng 3.1. Kết quả đo phát thải của động cơ nguyên bản và PCCI tại 2000 (v/ph), 30% tải, góc phun sớm 45° góc quay trục khuỷu

Diesel, $\phi_s = 20^\circ$				PCCI, $\phi_s = 45^\circ$				So sánh Diesel và PCCI			
HC	CO	NOx	Smoke	HC	CO	NOx	Smoke	HC	CO	NOx	Smoke
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%			
118	0,08	359	29,8	120	0,18	43	0,8	1,67	55	-88	-97,32

Từ kết quả phát thải chúng ta có thể thấy rằng, cơ chế cháy PCCI với góc phun sớm 45° thì phát thải NOx và độ khói giảm tương ứng là 88% và 97,32%. Trong khi đó, HC và CO tăng 55%. Điều này là do động cơ cháy theo kiểu PCCI có hỗn hợp đồng nhất hơn, nhiệt độ cháy thấp hơn nên cải thiện được phát thải NOx và độ khói.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đóng góp được các vấn đề sau đây:

- (1) Đánh giá được đặc tính cháy của động cơ khi thiết lập cơ chế cháy PCCI. Khi tăng góc phun sớm thì ngọn lửa lạnh bắt đầu

xuất hiện, đây là tiền đề để thiết lập cơ chế cháy PCCI.

(2) Khi cố định tải 30%, tốc độ 2000 (vòng/phút) và áp suất phun 450 bar với góc phun sớm là 45° góc quay trục khuỷu trước điểm chết trên thì động cơ diesel cháy theo cơ chế PCCI. Đồng thời, phát thải NOx và độ khói lần lượt giảm 88%, 97,32% so với động cơ diesel nguyên thủy.

#### Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải đề tài mã số T2024-CK-006. ❖

Ngày nhận bài: **07/02/2025**

Ngày phản biện: **22/02/2025**

#### Tài liệu tham khảo:

- [1]. B. Aydogan, A. Calam, “Combustion, Performance and emission characteristics of a HCCI engine fuelled with n-butanol/n-heptane blends”. *Int J Automotive Eng Technol*, 9 (2020), 1-10. <https://doi.org/10.18245/ijaet.593811>.
- [2]. H. Yang, S. Shuai, Z. Wang, and J. Wang, “High Efficiency and Low Pollutants Combustion: Gasoline Multiple Premixed Compression Ignition (MPCI)”. *SAE Technical Paper*, (2012). <https://doi.org/10.4271/2012-01-0382>.
- [3]. Y. Qian, Z. Wu, J. Guo, Z. Li, C. Jiang, X. Lu, “Experimental studies on the key parameters controlling the combustion and emission in premixed charge compression ignition concept based on diesel surrogates”. *Applied Energy*, 235 (2019), 233-246. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.104>.
- [4]. A. Jain, A.P. Singh, A.K. Agarwal, “Effect of fuel injection parameters on combustion stability and emissions of a mineral diesel fueled partially premixed charge compression ignition (PCCI) engine”. *Applied Energy*, 190 (2017), 658-669. <https://doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.164>.
- [5]. X. Liang, Z. Zheng, H. Zhang, Y. Wang, H. Yu, “A Review of early injection strategy in premixed combustion engines”. *Applied Sciences* (2019), <https://doi.org/10.3390/app9183737>.
- [6]. P.K. Sahoo, L.M. Das, “Combustion analysis of *Jatropha*, *Karanja* and *Polanga* based biodiesel as fuel in a diesel engine”. *Fuel*, volume 88, Issue 6 (2009), pages 994-999.
- [7]. Ayush Jain, Akhilendra Pratap Singh, Avinash Kumar Agarwal, “Effect of fuel injection parameters on combustion stability and emissions of a mineral diesel fueled partially premixed charge compression ignition (PCCI) engine”. *Applied Energy*, Volume 190, 15 March 2017, Pages 658-669. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.164>.

# PHÂN LOẠI MÔ HÌNH SẤY VÀ ỨNG DỤNG MÔ HÌNH BÁN THỰC NGHIỆM TRONG MÔ HÌNH HÓA QUÁ TRÌNH VÀ THIẾT BỊ SẤY

CLASSIFICATION OF DRYING MODELS AND APPLICATION OF SEMI-EMPIRICAL MODELS IN DRYING PROCESS AND EQUIPMENT MODELING

**Nguyễn Thị Thùy Dung**  
Trường Đại học Giao thông Vận tải

Email: [nttdung\\_ktn@utct.edu.vn](mailto:nttdung_ktn@utct.edu.vn)

## TÓM TẮT

Sấy là quá trình truyền nhiệt - truyền chất liên hợp ảnh hưởng của nhiều yếu tố bao gồm điều kiện sấy, đặc điểm cấu trúc của vật liệu và phương pháp sấy. Để đáp ứng yêu cầu thiết kế hệ thống sấy với mục tiêu tiết kiệm năng lượng và nâng cao chất lượng sản phẩm, thì việc xây dựng các mô hình toán học để mô tả chính xác hiện tượng trao đổi nhiệt - ẩm khi sấy là cần thiết. Hiện nay, các mô hình được ứng dụng phổ biến khi nghiên cứu về kỹ thuật sấy là mô hình thực nghiệm, mô hình lý thuyết và mô hình bán thực nghiệm. Trong bài báo này, nhóm tác giả tiến hành tổng hợp, phân tích và đánh giá các mô hình sấy. Đồng thời, mô hình bán thực nghiệm năng lượng hoạt hóa (REA) được tập trung nghiên cứu. Mô hình bán thực nghiệm đơn giản hơn mô hình lý thuyết nhưng chính xác hơn mô hình thực nghiệm cho phép xác định các thông số động học của quá trình sấy vật liệu được nhanh chóng. Mô hình năng lượng hoạt hóa REA được ứng dụng đa dạng cho các loại vật liệu sấy dạng hạt, dung dịch huyền phù và lớp mỏng. Nhờ khả năng dự đoán tốt, mô hình bán thực nghiệm REA có thể được sử dụng để biểu diễn tương tác nhiệt ẩm giữa sản phẩm và tác nhân sấy trong tính toán thiết kế các hệ thống sấy.

**Từ khóa:** Mô hình sấy; Mô hình thực nghiệm; Mô hình lý thuyết; Mô hình bán thực nghiệm; Mô hình năng lượng hoạt hóa REA.

## ABSTRACT

Drying is a combined heat and mass transfer process influenced by multiple factors, including drying conditions, the mechanical and physical properties of materials, and the drying method. To meet the requirements of the drying process - such as determining kinetic parameters, ensuring the quality of dried products, and optimizing the process for energy savings - it is necessary to establish mathematical models that accurately describe heat and moisture transfer phenomena. Recently, three drying models are widely used: empirical models, theoretical models, and semi-empirical models. At the same time, the semi-empirical model, the Reaction Engineering Approach (REA) modes is focused on for research. The semi-empirical model is simpler than the theoretical model but more accurate than the experimental model, allowing for the rapid determination of the kinetic



*parameters of the material drying process. The REA models were implemented in various particle/droplet/thin-layer of materials. Due to their good predictive capabilities, the semi-empirical model REA can be used to represent the heat and mass transfer interaction between the product and the drying agent in the design calculations of drying systems.*

**Keywords:** *Drying model; Empirical model; Theoretical model; Semi-empirical model; Reaction Energy Activation (REA).*

## 1. GIỚI THIỆU

Kỹ thuật sấy là quá trình xử lý nhiệt ẩm phức tạp được ứng dụng vào nhiều ngành lĩnh vực khoa học kỹ thuật khác nhau như hóa học, dược phẩm, sản xuất giấy, khai khoáng, nông nghiệp. Trong nông nghiệp, đặc biệt là bảo quản nông sản sau thu hoạch thì công nghệ sấy đóng vai trò quan trọng bởi quá trình sấy loại bỏ ẩm nên ức chế sự phát triển của vi sinh vật trong vật liệu, từ đó kéo dài tuổi thọ sản phẩm, duy trì chất lượng, giảm chi phí đóng gói và vận chuyển. Để đánh giá được chất lượng của vật liệu cuối quá trình sấy thông qua các chỉ tiêu chính như: hoạt độ nước, sự biến đổi màu sắc, đặc tính bù nước, thành phần dinh dưỡng và vi cấu trúc, dự đoán mô hình thiết kế máy sấy, đưa ra quy trình vận hành tối ưu để tiết kiệm năng lượng thì xác định chính xác các thông số động học quá trình sấy là cần thiết [1]. Tuy nhiên, sấy là quá trình truyền nhiệt - truyền chất liên hợp chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố: nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ gió của tác nhân sấy; hình dạng, đặc tính và cấu trúc của vật liệu; các cơ chế vật lý của quá trình truyền dẫn như dẫn nhiệt, đối lưu, khuếch tán, hiện tượng mao dẫn và chuyển pha lên xác định phân bố nhiệt - ẩm của vật liệu gặp nhiều thách thức [2], [3]. Bởi vậy, để hướng tới bài toán nâng cao chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa về năng lượng sử dụng thì cần xây dựng, phát triển và mô phỏng các mô hình toán quá trình sấy.

Các mô hình toán ra đời vào đầu thế kỷ

20, theo thời gian đã được phát triển, ứng dụng vào thiết kế và xây dựng các hệ thống sấy mới, tối ưu hóa quy trình sấy cũng như mô tả toàn bộ quá trình, bao gồm truyền nhiệt và truyền chất ở cấp độ vĩ mô và vi mô. Ba mô hình toán được sử dụng phổ biến mô tả quá trình sấy vật liệu bao gồm mô hình thực nghiệm, mô hình thuyết và bán thực nghiệm [1], [4]. Mô hình thực nghiệm được xây dựng dựa vào phương pháp hồi quy thực nghiệm nên không cần thiết lập hệ phương trình vi phân [3]. Đặc điểm của mô hình là đơn giản, dễ sử dụng nhưng các hiện tượng vật lý miêu tả quá trình bị bỏ qua hoặc đề cập hạn chế, do đó các tham số của mô hình là rời rạc, không có tính quy luật và thay đổi theo điều kiện sấy [3], [5]. Trong khi đó, mô hình lý thuyết được xây dựng trên cơ sở phân tích, đánh giá tổng hợp các cơ chế vật lý về truyền nhiệt, truyền ẩm, khuếch tán, mao dẫn và điều kiện sấy tác động lên vật liệu [2], [3]. Các thông số động học quá trình có được nhờ thiết lập hệ phương trình vi phân riêng phần và giải hệ với sự hỗ trợ của các phương pháp số: sai phân hữu hạn, phần tử hữu hạn và thể tích hữu hạn [4], [6]. Trong đó, các tham số của mô hình được xác định từ thực nghiệm hoặc mô phỏng số. Chính vì điều này mà mô hình lý thuyết, đặc biệt là mô hình liên tục được xem là mô hình hiện đại và chính xác nhất khi mô tả quá trình sấy [4], [6]. Tuy nhiên, để giải bài toán theo mô hình lý thuyết thì cần phân tích chặt chẽ các hiện tượng vật lý để thiết lập phương trình cân bằng vật chất và cân bằng năng lượng, cung cấp đầy đủ các điều kiện đơn trị, am hiểu về

phương pháp số và sử dụng thành tạo công cụ mô phỏng.

Đơn giản hơn mô hình lý thuyết nhưng chính xác hơn mô hình thực nghiệm, đó chính là mô hình bán thực nghiệm [6], [7]. Một trong những mô hình bán thực nghiệm hữu ích hiện nay là mô hình năng lượng hoạt hóa (Reaction Engineering Approach - REA) [8], [9]. Đây được coi là mô hình không chiều, phân bố nhiệt độ và độ ẩm xem như đồng đều trong vật liệu và chỉ thay đổi theo biến thời gian. Do đó, hệ phương trình vi phân biểu diễn quá trình nhiệt - ẩm là phương trình vi phân đạo hàm thường và có thể giải được bằng kỹ thuật số đơn giản [2]. Ưu điểm của mô hình bán thực nghiệm là các tham số thay đổi rất ít theo điều kiện sấy [2], [10]. Mô hình bán thực nghiệm đã được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng để mô tả quá trình truyền nhiệt, truyền chất của các vật liệu dạng hạt, dung dịch huyền phù hay lớp mỏng và đa dạng các phương pháp sấy. Từ các công trình nghiên cứu của X.D. Chen và cộng sự [9], của Kharaghani. A [10] và Le. K [6] chỉ ra rằng mô hình năng lượng hoạt hóa có khả năng ngoại suy tốt nên được ứng dụng để dự đoán các thông số động học quá trình sấy và hỗ trợ thiết kế máy sấy.

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày 3 mô hình toán sử dụng phổ biến trong quá trình sấy bao gồm thực nghiệm, bán thực nghiệm và mô hình lý thuyết. Trong đó, nội dung chính tập trung vào mô hình bán thực nghiệm REA và các ứng dụng mô phỏng quá trình. Đây là một trong những nội dung còn mới trong lĩnh vực nghiên cứu công nghệ sấy ở Việt Nam.

## 2. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

Mô hình thực nghiệm thiết lập mối

quan hệ giữa độ ẩm trung bình với thời gian sấy được xây dựng và phát triển dựa trên phương pháp hồi quy [4, 6]. Độ ẩm không thứ nguyên MR xác định thông qua các phương trình thực nghiệm phụ thuộc vào thời gian sấy  $\tau$  và được tính theo công thức:

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (1)$$

Trong đó,  $X_0$  và  $X_{eq}$  lần lượt là độ ẩm ban đầu và độ ẩm cân bằng của vật liệu (kg. ẩm/kg.VLK). Độ ẩm X (kg. ẩm/kg.VLK) được xác định theo công thức:  $X = G_l/G_k$ , với  $G_l$  và  $G_k$  lần lượt là khối lượng nước lỏng và khối lượng chất rắn trong sản phẩm sấy. Một số mô hình thực nghiệm được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Một số mô hình thực nghiệm hoàn toàn

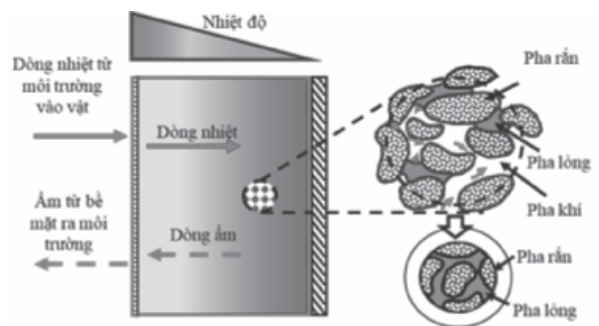
STT	Tên mô hình	Mô hình	Tài liệu
1	Mô hình Newton	$MR = \exp(-k\tau)$	[1]
2	Mô hình Page	$MR = \exp(-k\tau^n)$	[5]
3	Mô hình Henderson - Pabis	$MR = a \exp(-k\tau)$	[11]
4	Mô hình Henderson - Pabis cải tiến	$MR = a \exp(-k\tau) + b \exp(-g\tau) + c \exp(-h\tau)$	[11]
5	Mô hình Logarithmic	$MR = a \exp(-k\tau) + c$	[12]
6	Mô hình Thompmos	$t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$	[13]
7	Mô hình Weibull	$MR = a - b \exp(k_0\tau^n)$	[14]
8	Mô hình Silva và cộng sự	$MR = \exp(-a\tau - b\sqrt{\tau})$	[14]
9	Mô hình Aghbashlo và cộng sự	$MR = \exp\left(\frac{K_1\tau}{1 + K_2\tau}\right)$	[3]

Các phương trình hồi quy này có thể được phân thành hai nhóm. Nhóm đầu tiên là các mô hình thực nghiệm tựa lý thuyết được phát triển dựa trên lời giải xấp xỉ của mô hình khuếch tán Fick và sự tương đồng giữa bài toán khuếch tán ẩm và bài toán dẫn nhiệt [3], [5]. Các mô hình bán lý thuyết như Lewis, Page và Modified Page được phát triển từ lời giải Newton của bài toán dẫn nhiệt điều kiện biên loại 3. Các mô hình: mô hình hàm mũ và dạng đơn giản hóa của nó, mô hình hàm mũ 2 thành phần và dạng sửa đổi, mô hình hàm mũ 3 thành phần và dạng đơn giản hóa đều được phát triển từ việc xấp xỉ lời giải định luật Fick. Một số mô hình như mô hình Silva, của Aghbashlo và mô hình Weibull được xây dựng dựa trên hình dạng tương đồng giữa đồ thị toán học và sự biến đổi thực nghiệm của độ ẩm không thứ nguyên MR. Mức độ phức tạp của các mô hình phụ thuộc số lượng hằng số nhưng việc lựa chọn mô hình mô tả quá trình sấy thường dựa theo dữ liệu thống kê để đánh giá sai số cũng như tính đơn giản của mô hình để áp dụng trong thực tế. Tuy nhiên, các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng các tham số này có khả năng biến đổi mạnh và không có quy luật khi điều kiện sấy thay đổi. Do đó, khả năng ứng dụng mô hình thực nghiệm để dự đoán quá trình sấy trong một dải rộng điều kiện vận hành của thiết bị sấy rất hạn chế và thiếu độ chính xác.

### 3. MÔ HÌNH LÝ THUYẾT

Khác với mô hình thực nghiệm, mô hình lý thuyết được xây dựng và phát triển dựa vào định luật bảo toàn vật chất và năng lượng. Hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng thiết lập mối quan hệ của phân bố nhiệt độ, độ ẩm với không gian và thời gian. Bởi vậy, mô hình lý thuyết được coi là mô hình có lời giải chính xác nhất mô tả hiện tượng truyền nhiệt - truyền chất trong quá trình sấy [4], [6]. Tùy vào mức

độ phân tích các ảnh hưởng của các cơ chế vật lý vận chuyển nhiệt và chất trong lòng vật liệu và từ bề mặt vật liệu vào môi trường cũng như phương pháp mô hình hóa mô phỏng quá trình mà độ phức tạp và tính chính xác của hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng là khác nhau. Các quá trình sấy thường được mô hình hóa bằng mô hình khuếch tán với giả thiết động lực của quá trình dịch chuyển ẩm là gradient của độ ẩm [2], [3]. Phương trình khuếch tán được xem là mô hình lý thuyết đầu tiên được hai nhà khoa học Lewis và Sherwood xây dựng và phát triển vào đầu thế kỷ XX dựa trên định luật Fourier về dẫn nhiệt và định luật Fick II về khuếch tán ẩm. Đặc điểm của mô hình là quá trình dịch chuyển ẩm gồm hai giai đoạn độc lập: khuếch tán ẩm từ trong lòng vật liệu ra bề mặt và sự bay hơi ẩm từ bề mặt ra môi trường. Mô hình khuếch tán vật liệu được coi gồm pha rắn và lỏng và được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Mô hình khuếch tán

Ceaglseke và Houghen [15] đã bổ sung và sửa đổi mô hình khuếch tán theo phương trình (2):

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla X) \quad (2)$$

Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng được xác định là hàm phụ thuộc vào điều kiện sấy và đặc tính của vật liệu, có thể là tuyến tính, hàm mũ, hàm phân số hoặc đa thức. Trong nhiều

thập kỷ qua, nhiều nhà khoa học nỗ lực nghiên cứu và công bố phương pháp xác định hệ số khuếch tán để hoàn thiện mô hình. Tuy nhiên, sấy là quá trình phức hợp chịu tác động của nhiều yếu tố nên hệ số khuếch tán ảnh hưởng không thể là một tham số gộp phản ánh đầy đủ cơ chế dịch chuyển nhiệt - ẩm của quá trình sấy. Thêm vào nữa, mô hình khuếch tán không xem xét đến dòng chảy hai pha (hỗn hợp của hơi và lỏng) và sự thoát ẩm diễn ra tập trung trên bề mặt vật liệu nên mô hình khó có thể mô tả chính xác các cơ chế của quá trình sấy. Mặc dù vậy, mô hình khuếch tán vẫn được sử dụng rộng rãi bởi tính đơn giản và hữu ích trong thực nghiệm của số trường hợp cụ thể.

Năm 1966, Luikov [16] đã xây dựng hệ phương trình vi phân mô tả một cách khá đầy đủ các cơ chế ảnh hưởng đến quá trình truyền nhiệt, truyền chất trong quá trình sấy vật liệu xốp mao dẫn. Trong đó, gradient nhiệt độ, gradient độ ẩm và gradient áp suất được đánh giá đồng thời vào quá trình trao đổi nhiệt - ẩm. Hệ phương trình vi phân truyền nhiệt - truyền chất được viết dưới dạng:

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 X + K_{12} \nabla^2 t + K_{13} \nabla^2 P \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 X + K_{22} \nabla^2 t + K_{23} \nabla^2 P \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} \nabla^2 X + K_{32} \nabla^2 t + K_{33} \nabla^2 P \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó:  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  lần lượt đại diện cho hệ số khuếch tán ẩm, hệ số dẫn nhiệt và hệ số thấm;  $K_{ij}$  là các hệ số ảnh hưởng chéo giữa hàm lượng ẩm, nhiệt độ và áp suất. Mô hình Luikov đánh giá một cách khá toàn diện về tác động đồng thời của các cơ chế vật lý lên quá trình sấy. Tuy nhiên, trên thực tế để xác định được đầy đủ các tham số trong mô hình (3) là rất khó khăn, đặc biệt là ảnh hưởng của áp suất.

Stephen Whitaker cuối những năm 1970 và đầu những năm 1980 đã hoàn thiện mô hình liên tục dựa trên kỹ thuật trung bình thể tích, tạo ra một bước đột phá trong việc nghiên cứu quá trình truyền nhiệt - truyền chất của vật liệu sấy [17]. Mô hình này được xem là mô hình hiện đại, phức tạp và chính xác nhất khi mô tả quá trình sấy của vật liệu xốp tính đến nay [3], [4]. Vật liệu sấy được cấu tạo bởi 3 pha: rắn, lỏng và khí (hỗn hợp của không khí khô và hơi nước). Sự bay hơi ẩm trong vật liệu được diễn ra trong cả 2 pha: bay hơi của lỏng trong pha lỏng và bay hơi của hơi trong pha khí. Độ ẩm của vật liệu sấy giảm dần theo thời gian bởi các cơ chế truyền ẩm: khuếch tán của không khí, đối lưu của không khí, khuếch tán của hơi nước, đối lưu của hơi nước, lực mao dẫn; cơ chế truyền nhiệt gồm dẫn nhiệt, đối lưu và khuếch tán. Phương trình cân bằng vật chất viết cho nước ở cả dạng lỏng và dạng hơi, viết cho không khí lần lượt theo phương trình (4) và (5).

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_v \varepsilon_v + \rho_v \varepsilon_g) + \nabla \cdot (\rho_v v_v) + \nabla \cdot (\rho_v v_g) - \nabla \cdot \left( \rho_g D_{eff} \nabla \left( \frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_a \varepsilon_g) + \nabla \cdot (\rho_a v_g) - \nabla \cdot \left( \rho_g D_{eff} \nabla \left( \frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \right) = 0 \quad (5)$$

Phương trình truyền nhiệt dựa trên việc xét một phân tử thể tích, hiệu dòng entanpi của lỏng, hơi và không khí khô đi vào và đi ra khỏi phân tử cùng với dòng nhiệt do dẫn nhiệt dưới tác dụng của chênh lệch nhiệt độ chính là nguyên nhân gây nên sự thay đổi mật độ năng lượng bên trong phân tử.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_s \varepsilon_s h_s + \rho_s \varepsilon_l h_l + \rho_s \varepsilon_g h_g + \rho_s \varepsilon_a h_a) + \nabla \cdot [\rho_s h_s v_s + (\rho_s h_l + \rho_s h_g) v_g] \\ - \nabla \cdot \left[ h_s \rho_s D_{eff} \nabla \left( \frac{\rho_s}{\rho_g} \right) \right] - \nabla \cdot \left[ h_l \rho_s D_{eff} \nabla \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right) \right] - \nabla \cdot [\lambda_{eff} \nabla (T)] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Một trong những khó khăn gặp phải khi giải quyết bài toán truyền nhiệt - truyền chất

theo Whitaker là cần xác định các hệ số như hệ số khuếch tán, hệ số thấm tuyệt đối và tương đối, hệ số dẫn nhiệt. Các hệ số này phụ thuộc lớn vào cấu trúc vật liệu, nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ gió của tác nhân sấy. Thêm vào đó, hệ phương trình vi phân kết hợp giữa truyền nhiệt và truyền chất thường là phi tuyến và để giải được thường phải sử dụng phương pháp số phức tạp.

#### 4. MÔ HÌNH BÁN THỰC NGHIỆM

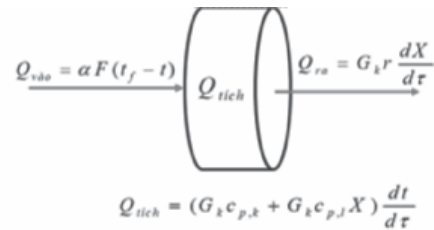
Mô hình bán thực nghiệm - mô hình năng lượng hoạt hóa (REA) được X.D. Chen đề xuất vào năm 1996, là mô hình bán thực nghiệm có khả năng ngoại suy và dự đoán các thông số động học quá trình sấy hiệu quả, tối ưu hóa số lần thí nghiệm, đặc biệt là trong các điều kiện sấy phức tạp như nhiệt độ sấy cao, tốc độ sấy lớn, mẫu quá nhỏ hoặc quá lớn [6], [9], [18]. Mô hình sấy năng lượng hoạt hóa dựa trên ý tưởng coi quá trình bay hơi từ bề mặt vật liệu vào môi trường sấy là phản ứng bay hơi với nhiệt ẩn hóa hơi là năng lượng cần thiết để vượt qua rào cản năng lượng tương tự như năng lượng hoạt hóa trong phản ứng hóa học [2].

Mô hình REA là mô hình không chiều có  $Bi < 0,1$  với vật liệu ứng dụng chủ yếu ở dạng hạt, lớp mỏng và dung dịch huyền phù, vật liệu sấy có thể là thực phẩm hoặc phi thực phẩm. Phân bố nhiệt độ và độ ẩm của vật liệu sấy được coi là đồng đều trong suốt quá trình sấy [2], [7]. Mật độ hơi trên bề mặt vật liệu là hàm của độ ẩm trung bình và được thể hiện theo phương trình:

$$\frac{dX}{d\tau} = -\frac{\beta F}{G_k}(\rho_v - \rho_{v,f}) \quad (7)$$

Trong đó:  $\beta$  (m/s) là hệ số trao đổi chất của bề mặt vật liệu với tác nhân sấy;  $\rho_v$  và  $\rho_f$  ( $\text{kg/m}^3$ ) lần lượt là độ ẩm tuyệt đối của không khí (hay khối lượng riêng của hơi nước) tại bề

mặt của vật liệu và của không khí;  $F$  ( $\text{m}^2$ ) là diện tích bề mặt trao đổi nhiệt ẩm của mẫu. Phương trình cân bằng năng lượng viết cho quá trình sấy dựa trên nguyên lý: tổng dòng nhiệt cấp ( $Q_{\text{vào}}$ ) cho vật liệu dưới dạng trao đổi nhiệt đối lưu sẽ làm tăng nhiệt độ của vật ( $Q_{\text{tích}}$ ) và bay hơi ẩm ra khỏi bề mặt ( $Q_{\text{ra}}$ ). Quá trình trao đổi nhiệt của mẫu được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Dòng năng lượng ra, vào vật trong quá trình sấy

Phương trình biểu diễn phân bố nhiệt độ của vật liệu theo thời gian:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha F (t_f - t) + r G_s \frac{dX}{d\tau}}{G_k C_{p,k} + G_k X C_{p,l}} \quad (8)$$

Trong đó:  $C_{p,k}$  và  $C_{p,l}$  lần lượt là nhiệt dung riêng của chất khô và lỏng ( $\text{J/kg.K}$ ),  $\alpha$  ( $\text{W/m}^2.\text{K}$ ) là hệ số trao đổi nhiệt đối lưu của bề mặt vật liệu với không khí;  $t_f$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) là nhiệt độ của dòng khí;  $r$  ( $\text{J/kg}$ ) nhiệt ẩn hóa hơi của nước. Để giải quyết được phương trình (7) và (8) thì tốc độ bay hơi trên bề mặt vật liệu ( $\rho_v$ ) là đại lượng cần xác định và đóng vai trò quyết định.

Trong đó, tốc độ bay hơi ẩm được xác định qua năng lượng hoạt hóa  $\Delta E_v$ . Độ ẩm tương đối của không khí tại bề mặt vật liệu  $\phi$  được xác định:

$$\phi = \exp\left(\frac{\Delta E_v}{RT}\right) = \frac{\rho_{v,s}}{\rho_{v,sat}(t)} \quad (9)$$

$\Delta E_v$  ( $\text{J/kg}$ ) là năng lượng hoạt hóa đại

diện cho trở kháng của quá trình bay hơi;  $R$  (J/kg.K) là hằng số phổ biến của chất khí;  $T$  (K) là nhiệt độ của không khí;  $\rho_{v,sat}(t)$  là độ chứa hơi bão hòa tại nhiệt độ bề mặt vật  $t$  được xác định theo biểu thức thực nghiệm [18]:

$$\rho_{v,sat} = 8,342 \times 10^{-3} - 4,8613 \times 10^{-5} t + 2,6575 \times 10^{-5} t^2 - 1,4807 \times 10^{-7} t^3 + 4,844 \times 10^{-9} t^4 \quad (10)$$

Thay phương trình (7) vào (9), năng lượng hoạt hóa  $\Delta E_v$  được xác định:

$$\Delta E_v = -RT \ln \left[ \frac{1}{\rho_{v,sat}(t)} \left( -\frac{m_s}{\beta A} \frac{dX}{d\tau} + \rho_{v,f} \right) \right] \quad (11)$$

Theo Chen [7], năng lượng hoạt hóa được đưa về dạng không thứ nguyên và biểu diễn theo hàm thực nghiệm của độ ẩm:

$$\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{v,eq}} = f(X - X_{eq}) \quad (12)$$

Năng lượng hoạt hóa cân bằng được xác định:

$$\Delta E_{v,eq} = -RT_f \ln \left( \frac{\rho_{v,s}}{\rho_{v,sat}(t_f)} \right) \quad (13)$$

Theo đó, khi xác định được năng lượng hoạt hóa, phương trình vi phân xác định tốc độ bay hơi ẩm của vật liệu được biểu diễn như sau:

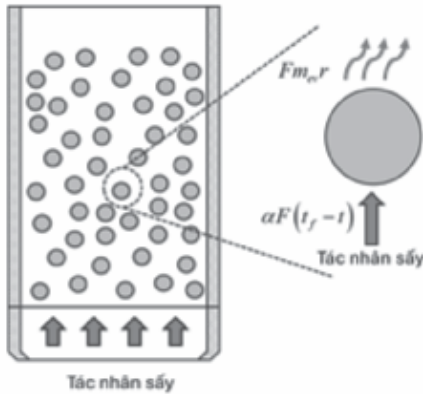
$$\frac{dX}{d\tau} = -\frac{\beta F}{G_s} \left[ \exp \left( \frac{\Delta E_v}{RT} \right) \rho_{v,sat}(t) - \rho_{v,f} \right] \quad (14)$$

Ưu điểm của mô hình năng lượng hoạt hóa là từ tốc độ bay hơi ẩm của vật liệu có được từ dữ liệu thực nghiệm ta có thể xác định được hàm truyền theo công thức (12). Từ một hàm truyền cho phép ta ứng dụng trong một dải rộng điều kiện sấy khác nhau, đặc biệt là trong các

điều kiện sấy phức tạp như nhiệt độ và tốc độ sấy cao, mẫu quá nhỏ hoặc quá lớn. Mô hình năng lượng hoạt hóa từ khi được X.D. Chen đề xuất từ năm 1996 đến nay đã được ứng dụng và phát triển đa dạng cho nhiều vật liệu và phương pháp sấy khác nhau, bao gồm các vật liệu thực phẩm: kiwi [19], nước trái nhàu [20], sữa [7], khoai tây - đậu xanh - vỏ chanh [21] hay là vật liệu phi thực phẩm: bùn [9], cao lanh [22] và các sản phẩm gỗ dạng lớp mỏng [23]. Ngoài ra, mô hình REA còn được dùng hiệu quả cho nhiều phương pháp sấy khác nhau như sấy đối lưu có hỗ trợ vi sóng [24], sấy kết hợp vi sóng - siêu âm - hồng ngoại [21], sấy gián đoạn [22] và sấy bằng hơi quá nhiệt [23]. Trong điều kiện thực nghiệm được chuẩn hóa, mô hình REA cho phép sử dụng một bộ số liệu chuẩn để từ đó ngoại suy xác định các thông số động học quá trình sấy với các trường hợp khác nhau về nhiệt độ sấy [6], [7], [10], [24], tốc độ gió [21], kích thước và thành phần cấu trúc vật liệu sấy [20], cường độ siêu âm [21], công suất phát vi sóng [24]. Từ đó cho thấy mô hình năng lượng hoạt hóa REA không quá phức tạp, linh hoạt và tối ưu hóa số lần thí nghiệm, tiết kiệm thời gian và chi phí vận hành máy sấy.

Bên cạnh đó, mô hình REA được coi là mô hình giảm cấp được ứng dụng trong các mô hình thiết bị sấy [25]. Như ta đã biết, các thí nghiệm xác định thực hiện trong phòng thí nghiệm thường được xác định với một hay một vài mẫu vật liệu sấy trong điều kiện nhiệt độ và độ ẩm không khí đồng nhất. Tuy nhiên, trong các thiết bị sấy thực tế, khi sấy đồng thời hàng chục đến hàng triệu mẫu vật liệu sấy đồng thời, sự thay đổi về nhiệt độ và độ ẩm của không khí trong không gian thiết bị dẫn đến sự khác nhau về tốc độ sấy ở các vị trí. Bên cạnh đó, việc giải đồng thời hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng của mô hình lý thuyết cho hàng nghìn mẫu vật liệu sấy là không thể. Do đó, mô hình

giảm cấp như REA được sử dụng để mô tả sự tương tác nhiệt ẩm giữa vật liệu và môi trường cũng như xác định biến thiên nhiệt độ, độ ẩm của vật liệu theo thời gian.



Hình 3. Mô hình thiết bị sấy tầng sôi.

Lấy ví dụ như thiết bị sấy tầng sôi được thể hiện trong hình 3, sự thay đổi của nhiệt độ và độ chứa hơi của tác nhân sấy theo chiều cao của thiết bị có thể được biểu diễn thông qua phương trình vi phân.

$$G_{kk} \frac{\partial h_{kk}}{\partial z} = -\alpha F_v (t_f - t) + m_{ev} F_v r \quad (15)$$

$$G_{kk} \frac{\partial d}{\partial z} = m_{ev} F_v \quad (16)$$

Tốc độ bay hơi  $m_{ev}$  trên bề mặt hạt được xác định theo phương trình (14) dựa vào giá trị độ ẩm, nhiệt độ tức thời của hạt và trạng thái của không khí ẩm tại vị trí đang xét. Trên cơ sở đó, quá trình trao đổi nhiệt ẩm trong thiết bị sấy có thể được dự đoán một cách chính xác để làm cơ sở cho việc thiết kế và vận hành tối ưu thiết bị [25]. Ưu điểm của phương pháp tiếp cận này là cho thời gian giải nhanh và có độ chính xác cao nhờ khả năng ngoại suy của mô hình bán thực nghiệm, đặc biệt là mô hình REA.

## 5. KẾT LUẬN

Từ các kết quả tìm hiểu, nghiên cứu và phân tích ở trên, bài báo có những kết luận sau:

(1) Mô hình thực nghiệm đơn giản, dễ thực hiện nhưng kết quả của mô hình có được thuần túy từ hồi quy thực nghiệm, các cơ chế vật lý bị hạn chế trong quá trình mô tả hiện tượng, tính phổ quát của phương trình chưa cao. Vì vậy, mô hình phù hợp với các bài toán dự báo kết thông số động học ban đầu và hỗ trợ thiết kế máy sấy.

(2) Mô hình lý thuyết được xây dựng trên cơ sở phân tích các hiện tượng vật lý nên tính tổng quát cao, tính phức tạp lớn. Kết quả mô hình có được là nhờ giải hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng. Có nhiều mô hình lý thuyết được đưa ra và đã được đề cập ở trên, mỗi mô hình sẽ có ưu và nhược điểm riêng. Trong đó, mô hình Whitaker được xem là mô hình có độ chính xác cao và được đánh giá là mô hình phức tạp nhất.

(3) Mô hình bán thực nghiệm đơn giản hơn mô hình lý thuyết nhưng chính xác hơn mô hình thực nghiệm. Trong đó, mô hình REA có ý nghĩa lớn trong việc dự báo thông số động học và phát triển mô hình thiết bị sấy. Đặc biệt, trong mô hình REA hàm truyền  $\Delta E_v / \Delta E_{v,eq} = f(X - X_{eq})$  chỉ cần xác định một lần và có thể sử dụng ngoại suy cho một dải điều kiện sấy, đặc biệt hữu ích trong ở các chế độ sấy phức tạp.

Việc phân loại các mô hình toán học của quá trình sấy sẽ giúp lựa chọn mô hình phù hợp với đối tượng mô phỏng nhằm giảm độ phức tạp và thời gian tính toán trong khi vẫn đảm bảo khả năng dự đoán của lời giải.



**Lời cảm ơn:**

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải trong đề tài mã số T2024- CK004. ❖

Ngày nhận bài: **06/02/2025**

Ngày phản biện: **21/02/2025**

**Tài liệu tham khảo:**

- [1]. Z. Erbay and F. Icier, “A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results”. May 2010. doi: 10.1080/10408390802437063.
- [2]. Lê Kiều Hiệp, Trần Thị Thu Hằng, “Phương pháp số giải bài toán truyền nhiệt, truyền chất trong ngành nhiệt”. NXB. Bách Khoa Hà Nội, 2022.
- [3]. M. U. Joardder, W. Akram, and A. Karim, “Heat and Mass Transfer Modelling During Drying: Empirical to Multiscale Approaches”. Taylor & Francis Group, LLC, 2022. doi: 10.1201/97804294611040.
- [4]. H. T. Vu and E. Tsotsas, “Mass and Heat Transport Models for Analysis of the Drying Process in Porous Media: A Review and Numerical Implementation”. 2018, Hindawi Limited. doi: 10.1155/2018/9456418.
- [5]. D. I. Onwude, N. Hashim, R. B. Janius, N. M. Nawi, and K. Abdan, “Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review”. Compr Rev Food Sci Food Saf, vol. 15, no. 3, pp. 599-618, May 2016, doi: 10.1111/1541-4337.12196.
- [6]. K. H. Le, T. T. H. Tran, N. A. Nguyen, and A. Kharaghani, “Multiscale Modeling of Superheated Steam Drying of Particulate Materials”. Chem Eng Technol, vol. 43, no. 5, pp. 913-922, May 2020, doi: 10.1002/ceat.201900602.
- [7]. X. D. Chen, “The basics of a reaction engineering approach to modeling air-drying of small droplets or thin-layer materials”. Drying Technology, vol. 26, no. 6, pp. 627-639, Jun. 2008, doi: 10.1080/07373930802045908.
- [8]. T. Thu, H. Tran, and K. H. Le, “Experimental and Numerical study of Superheated Steam Drying for Sliced Avocado 2 modeling”. May 2024. doi: 10.1002/ceat.202300323.
- [9]. A. Putranto and X. D. Chen, “A Simple and Effective Model for Modeling of Convective Drying of Sewage Sludge: The Reaction Engineering Approach (REA)”. Procedia Chem, vol. 9, pp. 77-87, 2014, doi: 10.1016/j.proche.2014.05.010.
- [10]. A. Kharaghani, K. H. Le, T. T. H. Tran, and E. Tsotsas, “Reaction engineering approach for modeling single wood particle drying at elevated air temperature”. Chem Eng Sci, vol. 199, pp. 602-612, May 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.01.042.
- [11]. C. Ertekin and M. Z. Firat, “A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products”. Crit Rev Food Sci Nutr, vol. 57, no. 4, pp. 701-717, Mar. 2017, doi: 10.1080/10408398.2014.910493.
- [12]. H. Kucuk, A. Midilli, A. Kilic, and I. Dincer, “A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations”. 2014, Taylor and Francis Inc. doi: 10.1080/07373937.2013.873047.
- [13]. S. A. and P. A. B. I. L. Pardeshi, “Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model”. Drying Technology, vol. 2, pp. 288-295, 2009.
- [14]. W. P. da Silva, C. M. D. P. S. e Silva, F. J. A. Gama, and J. P. Gomes, “Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas”. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, vol. 13, no. 1, pp. 67-74, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.jssas.2013.01.003.
- [15]. N. H. Ceaglske’ and A. Hougenz, “Drying granular solids”.
- [16]. A. V Luikov, “Application of irreversible thermodynamics methods to investigation of heat and mass transfer”. Pergamon Press, 1966.
- [17]. S. Whitaker and W. T. H. Chou, “Drying granular porous media - theory and experiment”. Drying Technology, vol. 1, no. 1, pp. 3-33, Jan. 1983, doi: 10.1080/07373938308916768.
- [18]. X. D. Chen and A. Putranto, “Reaction engineering approach (REA) to modeling drying problems: Recent development and implementations”. Drying Technology, vol. 33, no. 15-16, pp. 1899-1910, Sep. 2015, doi: 10.1080/07373937.2015.1069326.
- [19]. X. D. Chen, W. Pirini, and M. Ozilgen, “The reaction engineering approach to modelling drying of thin layer of pulped Kiwifruit flesh under conditions of small Biot numbers”, 2001. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/cep
- [20]. C. Zhang, N. Fu, S. Y. Quek, J. Zhang, and X. D. Chen, “Exploring the drying behaviors of microencapsulated noni juice using reaction engineering approach (REA) mathematical modelling”. J Food Eng, vol. 248, pp. 53-61, May 2019, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.12.016.
- [21]. A. Putranto and X. D. Chen, “Reaction engineering approach modeling of intensified drying of fruits and vegetables using microwave, ultrasonic and infrared-heating”. Drying Technology, vol. 38, no. 5-6, pp. 747-757, Apr. 2020, doi: 10.1080/07373937.2019.1708750.
- [22]. A. Putranto, X. D. Chen, S. Devahastin, Z. Xiao, and P. A. Webley, “Application of the reaction engineering approach (REA) for modeling intermittent drying under time-varying humidity and temperature”. Chem Eng Sci, vol. 66, no. 10, pp. 2149-2156, May 2011, doi: 10.1016/j.ces.2011.02.025.
- [23]. K. H. Le, N. Hampel, A. Kharaghani, A. Bück, and E. Tsotsas, “Superheated steam drying of single wood particles: A characteristic drying curve model deduced from continuum model simulations and assessed by experiments”. Drying Technology, vol. 36, no. 15, pp. 1866-1881, Nov. 2018, doi: 10.1080/07373937.2018.1444633.
- [24]. A. Putranto and X. D. Chen, “Microwave drying at various conditions modeled using the reaction engineering approach”. Drying Technology, vol. 34, no. 14, pp. 1654-1663, Oct. 2016, doi: 10.1080/07373937.2016.1166439.
- [25]. S. E. Lehmann, T. Oesau, A. Jongsma, F. Innings and S. Heinrich, “Material specific drying kinetics in fluidized bed drying under mechanical vibration using the reaction engineering approach”. Advanced Powder Technology, Vol. 31, Issue 12, pp. 4699-4713, December 2020.



## NGHIÊN CỨU DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA KHUNG NHÀ THÉP

## STUDY OF NATURE VIBRATION OF STEEL HOUSE FRAME

TS. Nguyễn Hữu Tú

Bộ môn Kỹ thuật cơ sở, Khoa Khoa học Cơ bản, Học viện Hậu cần

Email: huutu123456@gmail.com

## TÓM TẮT

Khung là kết cấu chịu lực được sử dụng phổ biến trong xây dựng như khung nhà xưởng, mái che sân vận động, mái che bể bơi; các công trình này cần có độ an toàn trong quá trình sử dụng. Trước hết, cần tính toán độ bền, độ cứng và độ ổn định của kết cấu khung, qua đó xác định kích thước tối hạn, lực tối hạn mà một kết cấu đó có thể chịu được. Tuy nhiên, trong thực tế đôi khi xuất hiện các dạng tải trọng có chu kỳ như: rung động do máy đầm, rung động do va đập, hoặc do các máy làm việc trong nhà xưởng gây ra; trong các trường hợp đó, nếu tần số dao động của tải trọng trùng với tần số dao động tự do của khung có thể xảy ra hiện tượng cộng hưởng, hiện tượng này có tác hại rất lớn đến công trình. Do vậy, việc tính toán, xác định được tần số dao động, xác định dạng dao động riêng của kết cấu khung sẽ là cơ sở để tránh hiện tượng cộng hưởng xảy ra; hoặc có những biện pháp khắc phục khi nó xảy ra. Trong nghiên cứu này, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để xác định tần số dao động riêng, đồng thời vẽ ra các dạng dao động riêng tương ứng. Kết quả tính toán có thể được dùng làm tham khảo và áp dụng vào thực tiễn.

**Từ khóa:** Khung phẳng; Phần tử hữu hạn; Tần số dao động riêng; Dạng dao động; Thép.

## ABSTRACT

Frames are load-bearing structures commonly used in construction, such as factory frames, stadium roofs, and swimming pool roofs. First of all, it is necessary to calculate the strength, stiffness and stability of the frame structure, thereby determining the critical size and critical force that a structure can be able to bear load. However, in reality, while the structure was under loading, cyclical loads sometimes appeared such as vibration caused by compactors, vibrations caused by impacts, or by machines working in the factory. In those cases, if the frequency of the load coincides with the free oscillation frequency of the frame, resonance phenomenon can occur, which can have great harm to the project. Therefore, calculating and determining the vibration frequency and determining the specific vibration mode of the frame structure will be the basis to avoid the resonance phenomenon occurring; or have measures to overcome this phenomenon when it occurs. In this study, the finite element method is used to determine the natural oscillation frequency and draw the corresponding natural oscillation forms. Calculation results can be used as reference and applied in practice.

**Keywords:** Frame; Finite element; Natural frequency; Vibration mode; Steel.



## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước, nhiều khu công nghiệp đã và đang được xây dựng. Trong đó, các nhà máy, nhà xưởng với nhiều kích thước, kết cấu khác nhau được xây dựng. Với đặc điểm: đơn giản, nhẹ, thời gian xây dựng ngắn, dễ dàng thay đổi, sửa chữa, đồng thời thân thiện với môi trường mà vẫn đảm bảo an toàn; cho nên kết cấu khung thép được xây dựng khá phổ biến hiện nay. Kết cấu khung thép còn được sử dụng để xây nhà trong các công trình dân sinh với nhiều ưu điểm nổi trội so với các loại kết cấu khác. Ngoài ra, trong xây dựng các công trình như sân vận động cỡ nhỏ, nhà thi đấu của nhiều môn thể thao, sân cầu lông, đá cầu, bóng chuyền, cầu mây, pickleball... kết cấu khung thép được ưu tiên lựa chọn hàng đầu. Để đảm bảo an toàn trong sử dụng, kết cấu đảm bảo đủ bền, đủ cứng và đảm bảo ổn định, đồng thời cần xác định tần số, dạng dao động riêng của chúng [1].

Kết cấu khung kim loại thường được làm từ thép hoặc thép hợp kim có độ bền cao, đây là những vật liệu phổ biến, dễ mua trên thị trường; do đó thuận tiện trong quá trình sửa chữa, bảo dưỡng hoặc thay thế. Các thông số vật liệu như mô đun đàn hồi ( $E$ ), hệ số Poisson ( $\nu$ ), khối lượng riêng ( $\rho$ )... thường đã được xác định [2, 3]. Khung thép thường được chế tạo từ các loại thép hình (chữ I, thép góc, thép máng...), chế tạo theo mô đun và được tiêu chuẩn hóa, nên thông số về mặt cắt ngang của kết cấu đã được xác định [2, 4]. Những thông số này rất cần thiết và làm đầu vào trong tính toán kết cấu khung, để xác định độ bền, độ cứng và độ ổn định cũng như tần số dao động riêng [5].

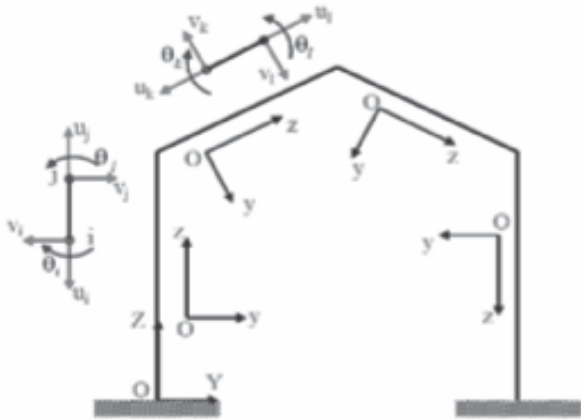
Có nhiều phương pháp để tính toán

kết cấu khung như: phương pháp giải tích [6], phương pháp thực nghiệm, mô phỏng bằng các phần mềm [5], hoặc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn [7-9]. Ngày nay, với sự phát triển của công nghệ thông tin, cho phép chúng ta sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán với thời gian ngắn, dễ dàng thay đổi điều kiện biên, số lượng phần tử lớn, kết cấu phức tạp, có thể sử dụng để mô phỏng kết cấu có kích thước vĩ mô, hoặc kết cấu kích thước cỡ nano mét [7-9]... cho ra kết quả tính toán có độ tin cậy cao. Chính vì vậy, trong nghiên cứu này tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để xác định tần số và dạng dao động riêng của kết cấu khung.

## 2. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN ĐỐI VỚI BÀI TOÁN KHUNG

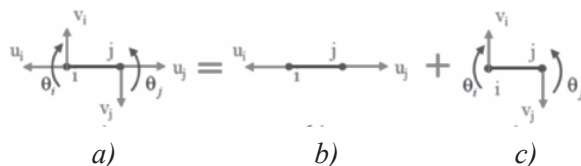
### 2.1. Xây dựng ma trận độ cứng của hệ khung phẳng

Đặc điểm chịu lực của khung phẳng là chịu kéo – nén, đồng thời chịu uốn [11]. Trục của khung là một đường gấp khúc, do vậy hệ trục tọa độ gắn với mặt cắt của khung thay đổi phụ thuộc vào từng đoạn khung (hình 1). Do đặc điểm chịu lực của khung, tại mỗi mặt cắt tồn tại 3 thành phần nội lực là lực dọc trục, lực cắt và mô men uốn; tương ứng là 3 thành phần biến dạng: dọc trục thanh ( $u$ ), độ võng ( $v$ ) và góc xoay của mặt cắt ( $\theta$ ). Để tính khung bằng phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng phần tử thanh hai nút, mỗi nút sẽ có 3 thành phần chuyển vị đặc trưng cho biến dạng dọc trục thanh, độ võng và góc xoay của mặt cắt ngang, khi đó chuyển vị của một phần tử khung hai nút là  $\{u\}_e = \{u_1, v_1, \theta_1, u_2, v_2, \theta_2\}^T$ , véc tơ chuyển vị này gắn với hệ trục tọa độ địa phương.



Hình 1. Kết cấu khung

Do khi chịu lực, các phần của khung chịu kéo – nén, đồng thời chịu uốn; nên theo nguyên lý cộng tác dụng, bài toán khung tương ứng với: bài toán kéo – nén đúng tâm cộng với bài toán uốn ngang phẳng của phần tử thanh hai nút (hình 2); ma trận độ cứng phần tử của phần tử khung sẽ được mở rộng từ ma trận độ cứng phần tử dầm chịu uốn, có xét đến ảnh hưởng của lực dọc trục [8,10].



Hình 2. Mô hình phần tử khung 2 nút. Trong đó: a) Phần tử khung 2 nút, b) Phần tử thanh chịu kéo, c) Phần tử dầm chịu uốn ngang phẳng [8, 10].

Ma trận độ cứng phần tử thanh chịu kéo xác định như sau [8, 10]:

$$[k_e]_{KN} = \frac{A_e E_e}{l_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó:  $A_e$  là diện tích mặt cắt ngang,  $E_e$  mô đun đàn hồi,  $l_e$  là chiều dài phần tử thanh.

Ma trận độ cứng phần tử dầm chịu uốn xác định như sau [8, 10]:

$$[k_e]_D = \frac{EJ}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ 12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Vì trên một phần tử khung có 2 nút, mỗi nút có 3 chuyển vị nên ma trận độ cứng phần tử khung  $[k_e]_{6 \times 6}$  có kích thước 6 hàng, 6 cột. Mở rộng ma trận phần tử thanh chịu kéo và phần tử dầm chịu uốn rồi cộng lại, ta được ma trận độ cứng phần tử khung [8, 10]:

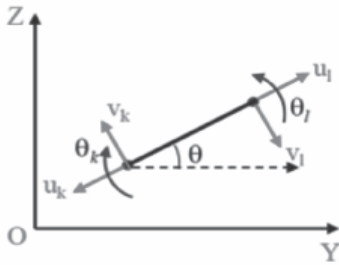
$$[\bar{k}_e]_{KH} = \begin{bmatrix} (AE/l_e) & 0 & 0 & (-AE/l_e) & 0 & 0 \\ 0 & 12EJ/l_e^3 & 6EJ/l_e^2 & 0 & -12EJ/l_e^3 & 6EJ/l_e^2 \\ 0 & 6EJ/l_e^2 & 4EJ/l_e & 0 & -6EJ/l_e^2 & 2EJ/l_e \\ (-AE/l_e) & 0 & 0 & (AE/l_e) & 0 & 0 \\ 0 & -12EJ/l_e^3 & -6EJ/l_e^2 & 0 & 12EJ/l_e^3 & -6EJ/l_e^2 \\ 0 & 6EJ/l_e^2 & 2EJ/l_e & 0 & -6EJ/l_e^2 & 4EJ/l_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ma trận độ cứng phần tử khung theo công thức (3) tính đối với hệ trục tọa độ địa phương gắn liền với phần tử, các phần tử tương ứng trên hình 1. Trong hệ trục tọa độ tổng thể, bậc tự do được tính tương ứng với chuyển vị địa phương thông qua ma trận quay [T], với biểu thức tính ma trận quay như sau:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó,  $\theta$  là góc tạo bởi trục phần tử khung với phương ngang (hình 3).





Hình 3. Phần tử khung trong hệ tọa độ tổng thể [8, 10].

Ma trận độ cứng phần tử khung trong hệ tọa độ tổng thể là:

$$[k_e]_{KH} = [T]^T [\bar{k}_e]_{KH} [T] \quad (5)$$

Từ đó, tính ma trận độ cứng tổng thể của khung  $[K]_{3N \times 3N}^{TT}$  là ma trận hợp khối của các ma trận độ cứng phần tử, với N là tổng số nút đã chia trong hệ. Sử dụng ma trận độ cứng tổng thể này để giải các bài toán về khung bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

## 2.2. Dao động tự do không cản của khung

Hệ phương trình phần tử hữu hạn của bài toán động lực học kết cấu được thiết lập và viết dưới dạng ma trận như sau [7, 8]:

$$[K]^{TT} \{q\} + [M]^{TT} \{\ddot{q}\} = \{f\} \quad (6)$$

Trong đó:  $[K]^{TT}$ ,  $[M]^{TT}$ ,  $\{q\}$ ,  $\{f\}$  lần lượt là ma trận độ cứng tổng thể, ma trận khối lượng tổng thể, véc tơ chuyển vị và véc tơ lực nút tương ứng của toàn khung.

Với bài toán khung, ma trận khối lượng tổng thể được thành lập từ ma trận khối lượng phần tử khung. Cách thiết lập ma trận khối lượng phần tử của phần tử khung trong hệ tọa độ địa phương tương tự như thiết lập ma trận độ cứng thông qua phần tử thanh chịu kéo và dầm chịu uốn [7, 8].

$$[m^*] = \frac{\rho A l_e}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l_e & 0 & 54 & -13l_e \\ 0 & 22l_e & 4l_e^2 & 0 & 13l_e & -3l_e \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l_e & 0 & 156 & -22l_e \\ 0 & -13l_e & -3l_e & 0 & -22l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Trong đó:  $\rho$  là khối lượng riêng, A: diện tích mặt cắt ngang của khung,  $l_e$  là độ dài phần tử.

Tương tự, đối với ma trận độ cứng, từ ma trận khối lượng phần tử ở tọa độ địa phương, tính ma trận độ cứng phần tử trên hệ trục tọa độ tổng thể thông qua ma trận quay [T], như sau:

$$[m_e]_{KH} = [T]^T [m^*]_{KH} [T] \quad (8)$$

Nếu vế phải  $\{f\} = \{0\}$ , phương trình (6) được gọi là phương trình dao động riêng không cản của hệ động lực [7, 8], nghiệm của phương trình (8) có dạng sau:

$$\{q\} = \{\bar{q}\} \sin(\omega t) \quad (9)$$

Trong đó:  $\{\bar{q}\}$  là véc tơ biên độ dao động tại các nút tương ứng.

Tính đạo hàm (9) rồi thay vào (6), ta được:

$$([K]^{TT} - \omega^2 [M]^{TT}) \{\bar{q}\} = \{0\} \quad (10)$$

Do điều kiện tồn tại nghiệm không tầm thường nên:

$$[K]^{TT} - \omega^2 [M]^{TT} = \{0\} \quad (11)$$

Nếu đặt  $\lambda = \omega^2$ , phương trình (11) có dạng:

$$[K]^{TT} - \lambda [M]^{TT} = \{0\} \quad (12)$$

Nghiệm của phương trình (12) chính là bài toán tìm trị riêng  $\lambda$ ; tần số góc dao động sẽ được tính là:  $\omega = \sqrt{\lambda}$  (rad/s) là tần số dao động riêng của hệ. Tương ứng với trị riêng  $\lambda$  là những véc tơ riêng, cũng chính là biên độ dao động lớn nhất tại các nút; khung ở những vị trí tương ứng là các dạng dao động riêng (mode). Sau đây là kết quả tính tần số dao động, dạng dao động riêng của một số kết cấu khung.

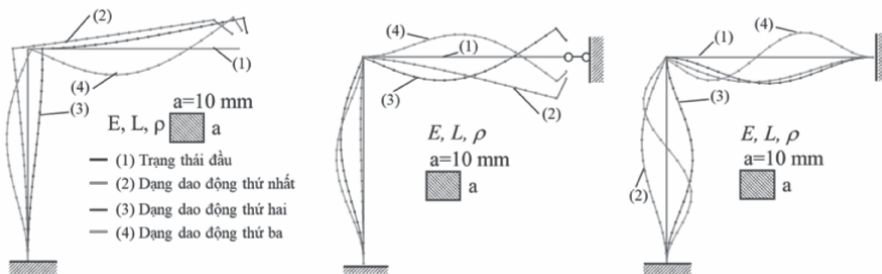
### 3. KẾT QUẢ TÍNH

#### 3.1. Dao động riêng của khung kết cấu $\Gamma$

Thông số bài toán:  $A = 10 \times 10$  (mm);  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>,  $E = 100$  GPa [7], số phần tử khung  $N = 40$ . Kết quả xác định tần số dao động tự do thể hiện trên bảng 1, dạng dao động riêng trên hình 4.

Bảng 1. Kết quả tần số dao động của khung  $\Gamma$ .

Tần số thứ	Ngàm một đầu, $\omega$ (rad/s)			Ngàm một đầu, một đầu liên kết tựa, $\omega$ (rad/s)	Ngàm hai đầu, $\omega$ (rad/s)
	Kết quả tính	Kết quả [7]	Sai số so với [7]	Kết quả tính	Kết quả tính
1	34,41	34	1,2 %	71,55	460,3
2	93,49	92	1,6 %	451,89	667,79
3	460,33	455	2,3 %	652,5	1491,37



Hình 4. Dạng dao động của khung  $\Gamma$  với điều kiện biên khác nhau.

#### 3.2. Dao động riêng của mô hình khung nhà thép hai mái nghiêng

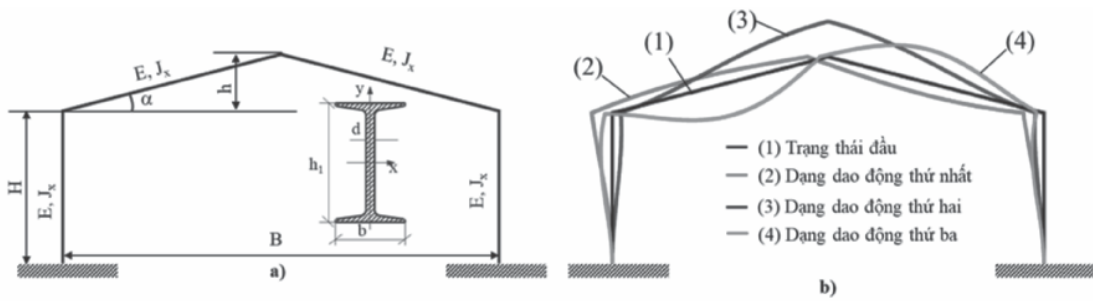
Mô hình khung nhà thép hai mái nghiêng chế tạo từ thép hình có mặt cắt ngang chữ I (hình 5), với thông số vật liệu như sau: số hiệu thép  $I_{40}$ , chiều rộng  $b = 400$  mm;  $h_1 = 155$  mm, diện tích mặt cắt ngang  $A = 71,4$  cm<sup>2</sup>, mô men quán tính  $J_x = 18930$  cm<sup>4</sup>, khối lượng riêng  $\rho = 7857$  kg/m<sup>3</sup>, mô đun đàn hồi  $E = 21.10^4$  MPa [2]; khung có kích thước: chiều cao  $H = 4$  m; chiều cao phần mái  $h = 2,5$  m, chiều rộng  $B = 12$  m; chia phần tử khung có chiều dài bằng

nau là  $l_c = 0,05$  m, khung được ngàm hai đầu. Kết quả tính tần số và dạng dao động của mô hình này được tổng hợp trong bảng 2 và hình 5.

Bảng 2. Kết quả tính tần số của khung nhà thép

Tần số thứ	Khung nhà thép ngàm hai đầu, $\omega$ (rad/s)
1	91,34
2	133,13
3	310,03





Hình 5. Dao động của mô hình khung nhà thép hai mái nghiêng, mặt cắt ngang chữ I:  
a) Mô hình khung; b) Dạng dao động riêng (mode).

### 3.3. Nhận xét kết quả tính

Với kết quả xác định tần số dao động của hai dạng khung, một số vấn đề rút ra như sau: tần số dao động riêng của khung  $\Gamma$  đã được so sánh với kết quả tính toán [7] khi khung có một đầu ngàm; trong bảng 1, sai số lớn nhất là 2,3%, điều đó cho thấy chương trình tính toán đáng tin cậy. Số liệu trong bảng 1 chỉ ra rằng, tần số dao động riêng của khung có hai đầu ngàm lớn nhất khi so sánh các tần số dao động riêng tương ứng. Trên hình 4, ba dạng dao động đầu tiên của khung  $\Gamma$  đã được vẽ ra tương ứng với các điều kiện biên. Từ đó, chúng ta xác định được những vùng có biên độ dao động tự do lớn nhất, cụ thể: đối với trường hợp khung có một đầu tự do hoặc một đầu là gối tựa, phía đầu tự do và phía gối tựa có biên độ dao động lớn nhất; ngược lại với trường hợp ngàm hai đầu, biên độ dao động lớn nhất xảy ra ở phía trong tùy thuộc vào dạng dao động riêng, nếu dạng dao động có 1 bụng sóng thì điểm giữa của các đoạn khung có biên độ lớn nhất, nếu là hai bụng sóng thì các điểm có biên độ lớn nhất khi cách hai đầu khung một đoạn 1/4 chiều dài đoạn khung.

Với mô hình khung nhà thép hai mái nghiêng chế tạo bằng thép hình  $I_{40}$ , các thông số vật liệu tương ứng, kết quả tính tần số dao động trên bảng số 2 cho thấy tần số dao động

của khung khá lớn. Với 3 dạng dao động riêng đầu tiên vẽ ra trên hình 5, dự đoán được vị trí hoặc vùng sẽ có biên độ dao động lớn nhất khi khung dao động. Ứng với dạng dao động thứ nhất, điểm góc của khung có biên độ theo phương ngang lớn nhất; với dạng dao động thứ hai đỉnh của khung dao động với biên độ lớn nhất; trong trường hợp thứ 3 thì biên độ dao động lớn nhất ở giữa của phần khung mái.

### 4. KẾT LUẬN

Thông qua chương trình tính dao động khung  $\Gamma$ , kết quả đã xác định được tần số dao động riêng không cân, đồng thời kết quả so sánh với [7] cho thấy chương trình tính có độ tin cậy cao. Mặt khác, với việc thay đổi điều kiện biên khác nhau, khi khung ngàm hai đầu, tần số dao động riêng là lớn nhất. Dạng dao động đã được vẽ ra tương ứng với các điều kiện biên, từ đó cho thấy sự khác nhau về biên độ và hình dạng của khung  $\Gamma$ . Trong nghiên cứu này, tần số dao động riêng của mô hình khung nhà bằng thép hai mái nghiêng với mặt cắt ngang chữ I (số hiệu  $I_{40}$ ) đã được xác định, các dạng dao động riêng tương ứng cũng được vẽ ra. Kết quả nghiên cứu có thể được dùng làm cơ sở để có thể tính toán dao động riêng của nhiều kết cấu khung khác nhau đang được dùng trong thực tế; hoặc cũng có thể là số liệu tham khảo khi thiết kế, thi công kết cấu khung nhà thép.

Trong các nghiên cứu tới, tác giả tập trung tính toán dao động riêng cho khung nhà nhiều tầng và kết cấu khung không gian. ❖

Ngày nhận bài: **05/02/2025**

Ngày phản biện: **20/02/2025**

### Tài liệu tham khảo:

- [1]. Al-Aasam HS, Mandal P. (2013), “*Simplified Procedure to Calculate by Hand the Natural Periods of Semirigid Steel Frames*”. J Struct Eng;139:1082–7.
- [2]. Bùi Trọng Lựu, Nguyễn Văn Vượng (2008), “*Bài tập sức bền vật liệu*”. NXB. Giáo dục.
- [3]. Beer FP, Ferdinand P. (2009), “*Mechanics of materials*”. McGraw-Hill Higher Education.
- [4]. FEMA (1998), “*310-Handbook for seismic evaluation of buildings*”, A pre-standard.
- [5]. Siddika A, Awall MR, Mamun MA Al, Humyra T (2019), “*Free vibration analysis of steel framed structures*”. J Rehabil Civ Eng, 7:70–8.
- [6]. Tomasiello S. (2011), “*A Simplified Quadrature Element Method to compute the natural frequencies of multispan beams and frame structures*”. Mech Res Commun;38:300–4.
- [7]. Trần Ích Thịnh, Ngô Như Khoa (2007), “*Phương pháp phần tử hữu hạn*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [8]. Lê Minh Quý (2019), “*Phương pháp phần tử hữu hạn*”. NXB. Giáo dục Việt Nam.
- [9]. Nguyen Danh Truong, Minh Quy Le, Tham Lam Bui, Hai Le Bui (2016), “*Atomistic simulation of free transverse vibration of graphene, hexagonal SiC, and BN nanosheets*”. Acta Mechanica Sinica, volume 33.
- [10]. Nguyễn Hữu Tú (2023), “*Xác định cơ tính của các màng mỏng vật liệu hai chiều P-CS, P-GEO, P-SNS và P- SNSE*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 310, Tr. 92-100.
- [11]. Lêu Thọ Trình, Đỗ Văn Bình (2011), “*Cơ học kết cấu*”. NXB. Xây dựng.

## DESIGN AND MANUFACTURING OF ULTRASONIC VIBRATION AMPLITUDE MEASURING DEVICE USING DIGITAL MICROMETER

THIẾT KẾ CHẾ TẠO THIẾT BỊ ĐO BIÊN ĐỘ RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM DÙNG PANME ĐIỆN TỬ ĐO ĐỘ DỊCH CHUYỂN

Do Thi Tam<sup>1</sup>, Le Duy Minh<sup>1</sup>, Vu Ngoc Pi<sup>1</sup>, Le Thu Quy<sup>2</sup>, Tran Thi Phuong Thao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen, Vietnam

<sup>2</sup>National Research Institute of Mechanical Engineering, Ha Noi, Vietnam

\*Corresponding author email: tranphuongthao@tnut.edu.vn

### ABSTRACT

*In order to support the study and use of ultrasonic vibration in mechanical processing, this work describes the design and manufacturing of an ultrasonic vibration amplitude measuring equipment. A digital micrometer is utilized in this investigation, which enables precise measurement of the vibration amplitude at an ultrasonic frequency of 20 kHz. This measuring device's basic idea is to measure the difference in distance between the oscillating surface and the measuring head using an oscilloscope, an electronic probe, and a digital micrometer (tolerance 0.001mm) in order to calculate the amplitude. An ultrasonic vibration head used for electrical discharge machining (EDM) has had its ultrasonic vibration amplitude measured by the instrument. Based on the research findings, the instrument can measure the amplitude of ultrasonic vibrations with an accuracy of up to 0.001 mm.*

**Keywords:** *Ultrasonic vibration amplitude; Measuring equipment; Digital micrometer; The sensor detects displacement; Measure displacement; Measure amplitude.*

### TÓM TẮT

*Bài báo này trình bày về nghiên cứu thiết kế và chế tạo một thiết bị đo biên độ rung động siêu âm nhằm phục vụ việc nghiên cứu và ứng dụng rung động siêu âm trong gia công cơ khí. Trong nghiên cứu này, một panme số được sử dụng, cho phép đo chính xác biên độ rung động ở tần số siêu âm 20 kHz. Ý tưởng cơ bản của thiết bị đo này là đo sự khác biệt về khoảng cách giữa bề mặt dao động và đầu đo bằng máy hiện sóng, đầu dò điện tử và panme số (dung sai 0,001mm) để xác định biên độ rung động. Để đánh giá thiết bị, một đầu rung động siêu âm sử dụng cho gia công xung điện (EDM) đã được đo biên độ rung động siêu âm bằng thiết bị này. Từ kết quả nghiên cứu, thiết bị đo biên độ rung động siêu âm với độ chính xác lên đến 0,001 mm đã được đề xuất.*

**Từ khóa:** *Biên độ rung động siêu âm; Thiết bị đo; Panme số; Đo độ dịch chuyển; Đo biên độ.*



## 1. INTRODUCTION

Mechanical vibrations with frequencies higher than the human hearing threshold, or above 20 kHz, are referred to as ultrasonic vibrations. As ultrasonic waves can pass through a variety of materials, including gases, liquids, and solids, they can produce significant effects that are frequently employed in industry and engineering. This unique characteristic makes ultrasonic vibrations a valuable tool in a variety of applications, including non-destructive material testing, ultrasonic welding, and mechanical processing. Piezoelectric transducers and magnetostrictive transducers are the two primary techniques used to produce ultrasonic vibrations. Magnetostrictive effects use magnetic fields to induce the expansion and contraction of materials, producing vibrations, whereas piezoelectric sensors use electrical energy to create mechanical vibrations. Based on these ideas, ultrasonic devices may produce vibrations with tiny amplitudes but extremely high frequencies, which aids in the completion of tasks requiring a high degree of precision.

Mechanical processing is one of the key areas where ultrasonic vibration is used. Electrical discharge machining (EDM), drilling, turning, polishing, and other processes are all accomplished with ultrasonic machining (USM) technology. The main benefit of this technique is that it doesn't produce heat, which helps protect the material from thermal deformation.

Since ultrasonic vibrations typically have amplitudes that are only in the nanoscale (nm) to micrometer ( $\mu\text{m}$ ) range, measurement techniques must be extremely accurate. Some popular techniques to measure the amplitude of ultrasonic oscillations are listed below.

The piezoelectric sensor is one of the primary techniques. The piezoelectric phenomenon, which occurs when a piezoelectric crystal is subjected to mechanical vibration, provides the basis for this sensor's operation. The oscillation's amplitude can be ascertained by analyzing this electrical signal [1]. Although this approach has the benefit of being simple to include into the measurement system, external variables like pressure and temperature might have an impact on accuracy.

Furthermore, the Laser Doppler Vibrometer (LDV) is a sophisticated technique that measures the amplitude and velocity of ultrasonic oscillations by utilizing the Doppler effect of laser light. Without coming into contact with the item, LDV can measure vibrations at the nanoscale level with extreme precision [2]. However, the LDV system is somewhat expensive, and in order to attain high efficiency, this approach needs a good light-reflecting surface.

In [3], the disappearing Fizeau fringe technique was used in the interferometric measurement of vibration amplitudes. When drilling with UV, a dial indicator with a two micron accuracy is utilized to measure the vibration amplitude at the tool tip [4]. The use of this method to measure the amplitude of ultrasonic vibration is also applied in rotary ultrasonic machining [5] and in drilling small and deep holes [6].

In this work, the ultrasonic vibration amplitude of an ultrasonic vibration head used for EDM is measured using a digital micrometer. This gadget can measure the amplitude of ultrasonic vibrations with an accuracy of up to 0.001 mm, according to measurement tests.



**2. DESIGN OF EQUIPMENT**

**2.1. Device description**

The schematic diagram of the ultrasonic vibration amplitude measurement device is shown in Figure 1. The main idea is to use an oscilloscope, an electronic probe, and a micrometer (tolerance 0.001mm) to measure the distance difference between the oscillating surface and the measuring head in order to determine the amplitude. The ultrasonic oscillation part (the horn) is powered by a 24V DC source. An oscilloscope is equipped with a probe sensor that measures the difference in distance between the measuring head and the oscillating surface in order to calculate the amplitude. The oscillation amplitude is measured by attaching a digital micrometer to the probe. The contact between the probe and the oscillating component surface (the horn) is detected by the oscilloscope.

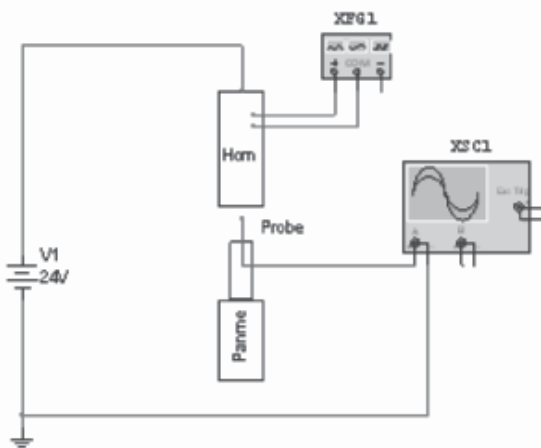


Figure 1. Schematic diagram of equipment

**2.2. Measurement method**

The following procedures are involved in determining the ultrasonic vibration's amplitude:

*Step 1: Determine the oscillating head's (the horn) stopping point (origin point).*

The digital panme and probe must first be fixed so that they line up with the direction of oscillation that has to be measured. After making sure the ultrasonic head (the horn) is in the stopping position (the origin point), the ultrasonic source is then switched off. Make sure the probe meets the horn surface by adjusting the digital panme to find the initial contact point. The oscilloscope shows 24V DC when in contact, indicating an electrical connection. The oscillation's source is the digital panme, which is now set to the 0.000 mark.

*Step 2: Move the probe and digital panme from the range of ultrasonic oscillations.*

Once the origin has been established, position the probe and digital panme approximately 0.5 mm (500 micrometers) from the horn surface. In order to prevent impact and guarantee that the measurement is unaffected by the initial location, this aids in the probe's separation from the horn surface.

*Step 3: Determine the peak-to-origin distance, or amplitude of the ultrasonic vibration.*

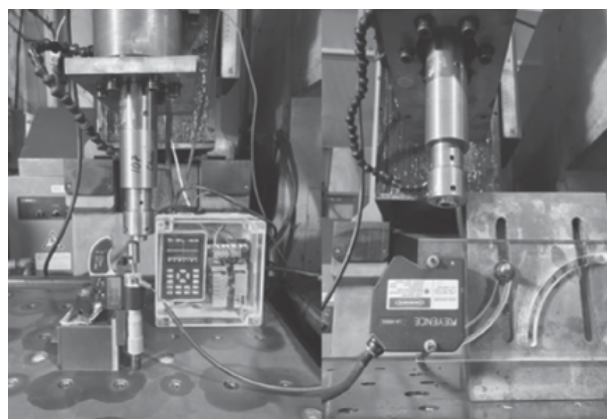
The horn head starts to oscillate when you turn on the ultrasonic source. Then, while keeping an eye on the oscilloscope's signal, gradually bring the probe closer to the oscillating surface. The electric pulse appears in phase with the ultrasonic vibration pulse when the probe makes contact with the horn surface, verifying the contact location.

The oscillation amplitude (in  $\mu\text{m}$ ) is now the value shown on the digital panme. To

find the ultrasonic frequency, simultaneously read the oscilloscope's electric oscillation frequency.

### 3. EXPERIMENTAL VERIFICATION

An ultrasonic vibration amplitude measuring device was made based on the design of the aforementioned measuring equipment. The following experiment (with the setup in Figure 1) was carried out to evaluate this device's accuracy: An ultrasonic source energized the oscillating head at a specific frequency (in this example, 20 kHz) while it was tightly fastened. To guarantee precise measurement, the manufactured measuring equipment was positioned with its measuring axis parallel to the horn head's oscillation direction (Fig. 2a).



a) b)  
Figure 2. Experimental setup

The amplitude of the horn head was measured with three values of the total length of the horn head, 113.4; 113.8, and 114.2 (mm) using the above device and a Laser Doppler Vibrometer (LDV) (Keyence LK-H055). The Keyence LK-H055 is a high-precision laser displacement sensor, with the following specifications: Standard measuring distance: 55 (mm); Measuring range: ±10(mm);

Wavelength of light source: 655 (nm); Repeatability: 0.025 (mm); Sampling cycle: 55/5/10/20/50/100/200/500/1000 (ms).

It is important to remember that the Keyence LK-H055 is positioned so that the laser beam is perpendicular to the oscillating surface when measuring the oscillation amplitude of the oscillating head (the horn) (Fig. 2b). This ensures precise measurement of the displacement of the surface in the oscillation direction.

The measurement results obtained from the two devices are used to evaluate the accuracy of the proposed device with Keyence LK-H055 using the following formula:

$$\Delta_A = \frac{A_{dp} - A_{Ldv}}{A_{dp}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Where  $\Delta_A$  is the discrepancy between the two results of the two measuring devices (%);  $A_{dp}$  and ALK are the amplitude measured by the designed device and by Keyence LK-H055.

Table 1. Comparative experimental results

Horn length (mm)	Amplitude (µm)		Discrepancy (%)
	New device	Keyence LK-H055	
11.9	2.0	1.75	12.5
12.3	1.2	1.15	4.17
12.7	1.5	1.60	6.25

The experimental results comparing the new measuring device with the Keyence LK-H055 are shown in Table 1. In this table, the measured values are the average of three measurements. From the measured results, it can be seen that the error between the measured

values by the new device and the Keyence LK-H055 ranges from 6.25 to 13.04%. This result shows that the new device can measure vibration amplitudes in the micrometer range with negligible errors. This proves that this measurement method can be applied to ultrasonic vibration amplitude measurement. However, it should be noted that when using this device, the contact force and the ability to continuously monitor the vibration may have an impact on the micrometer because it is a contact measurement technique.

## 4. CONCLUSIONS

This paper describes the design, manufacturing, and testing of a device for measuring ultrasonic vibration amplitude utilizing a digital micrometer. The test results indicate that the device accurately measures vibration amplitude within the micrometer range, exhibiting minimal errors relative to the LDV, thereby confirming the method's feasibility. This device demonstrates effectiveness and practical applicability, particularly in scenarios requiring a straightforward and economical measurement solution. The micrometer measurement method, while advantageous for its simplicity and low cost, has limitations related to its contact nature, which may compromise accuracy. Future integration of electronic sensors and automation of the measurement process will enhance performance.

## Acknowledgment:

This work was supported by Thai Nguyen University of Technology. ❖

## References:

- [1]. Francis, S.T., I.E. Morse, and R.T. Hinkle, "Mechanical vibrations: theory and applications". 1978: Allyn & Bacon.
- [2]. Castellini, P., M. Martarelli, and E.P. Tomasini, "Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs". Mechanical Systems and Signal Processing, 2006. 20(6): p. 1265-1285.
- [3]. Bowie, G.E., "Interferometric measurement of vibration amplitudes". Applied Optics, 1963. 2(10): p. 1061-1067.
- [4]. Hoseini, S.M. and J. Akbari, "Drilling of Engineering Ceramics using Combination of Ultrasonic Vibrations and Diamond Slurry", 2013.
- [5]. Cong, W., et al., "Vibration amplitude in rotary ultrasonic machining: a novel measurement method and effects of process variables", 2011.
- [6]. Chu Ngoc Hung, "Study of drilling small and deep holes in aluminum alloys with the assisted ultrasonic vibration", PhD. thesis, Thai Nguyen University of Technology, 2019.