



DOI:10.22144/ctujos.2026.085

## NGHIÊN CỨU DỰ ĐOÁN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT NHÔM 6061 KHI ĐÁNH BÓNG BẰNG LASER XUNG VỚI MÔ HÌNH MULTILAYER PERCEPTRON (MLP)

Nguyễn Hoài Tân, Nguyễn Văn Cường, Huỳnh Tuấn Cường Em, Nguyễn Thanh Thảo, Trần Văn Trường Hải, Nguyễn Nhứt Bằng và Nguyễn Văn Tài\*

Khoa Kỹ thuật Cơ khí, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): nvtai@ctu.edu.vn

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 15/02/2026

Sửa bài (Revised): 15/03/2026

Duyệt đăng (Accepted): 14/05/2026

**Title:** Predicting the surface roughness of 6061 aluminum by pulsed laser based on a multilayer perceptron (MLP) model

**Author(s):** Nguyen Hoai Tan, Nguyen Van Cuong, Huynh Tuan Cuong Em, Nguyen Thanh Thao, Tran Van Truong Hai, Nguyen Nhut Bang and Nguyen Van Tai\*

**Affiliation(s):** College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung phân tích ảnh hưởng của các thông số quá trình bao gồm công suất laser ( $P$ ), tốc độ quét ( $v$ ) và tần số xung ( $f$ ) đến độ nhám bề mặt hợp kim nhôm 6061 trong quy trình đánh bóng bằng laser Nd:YAG xung. Thí nghiệm được thiết lập đầy đủ với 27 tổ hợp và đánh giá độ nhám theo hai phương (Rax và Ray). Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho thấy Rax chịu ảnh hưởng chi phối của tốc độ quét, trong khi Ray phụ thuộc chủ yếu vào công suất laser. Đặc biệt, hiệu ứng tương tác  $P-v$  cũng cho thấy ý nghĩa thống kê đáng kể đối với độ nhám bề mặt. Hai mô hình Multilayer Perceptron (MLP) riêng biệt đã được xây dựng để dự đoán hai thông số độ nhám bề mặt Rax và Ray. Kết quả huấn luyện cho cả hai mô hình đều đạt độ chính xác cao trên tập kiểm tra với  $R^2$  lần lượt là 0,964 cho Rax và 0,961 cho Ray. Kết quả này cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa thông số đánh bóng bằng laser trên hợp kim nhôm 6061.

**Từ khóa:** Laser xung, đánh bóng bề mặt, hợp kim nhôm 6061, mạng nơ-ron MLP

### ABSTRACT

This study focuses on analyzing the effects of process parameters, including laser power ( $P$ ), scanning speed ( $v$ ), and pulse frequency ( $f$ ) on the surface roughness of 6061 aluminum alloy during pulsed Nd:YAG laser polishing. A full experimental design was conducted with 27 combinations, evaluating surface roughness in two directions (Rax and Ray). Analysis of variance (ANOVA) indicates that Rax is predominantly influenced by scanning speed, while Ray depends primarily on laser power. Notably, the  $P-v$  interaction effect also showed statistical significance regarding surface roughness. Furthermore, two separate Multilayer Perceptron (MLP) models were developed to predict Rax and Ray. The testing results demonstrate high prediction accuracy, with  $R^2$  values of 0.964 for Rax and 0.961 for Ray. These findings provide a scientific foundation for optimizing laser polishing parameters on 6061 aluminum alloy.

**Keywords:** Pulsed laser, Surface polishing, Aluminum 6061, Multilayer Perceptron neural network

## 1. GIỚI THIỆU

Trong sản xuất hộp mực máy in từ nhôm 6061, chất lượng bề mặt là yếu tố quyết định sự thành bại của công đoạn anốt hóa. Những khiếm khuyết sau khi phay như vết dao hay nhám không đều trực tiếp làm yếu đi liên kết bám dính của lớp phủ. Để giải quyết triệt để, công nghệ đánh bóng bằng laser (LP) đang dần thay thế các phương pháp cơ học truyền thống. Với hiệu suất cải thiện độ nhám vượt trội (80–90%), LP không chỉ tối ưu hóa khả năng chống mài mòn mà còn khẳng định bước tiến mới trong xu hướng sản xuất xanh hiện nay (Azarhoushang et al., 2021). Công nghệ LP đã trở thành một phương pháp tiên tiến, thay thế hoặc bổ sung cho các phương pháp truyền thống như đánh bóng cơ học hoặc điện hóa (Dubey & Yadava, 2008; Steen & Mazumder, 2010). Các nghiên cứu tổng quan gần đây báo cáo rằng LP có thể cải thiện độ nhám bề mặt từ 80–90% trong điều kiện tối ưu (Gisario et al., 2022; Manco et al., 2022).

Laser Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) được ưu tiên lựa chọn vì phát xạ ánh sáng tại bước sóng khoảng 1064 nm, cùng khả năng hoạt động ở chế độ xung hoặc liên tục (CW), cho phép điều chỉnh linh hoạt công suất và tần số theo yêu cầu. Điều này giúp kiểm soát vùng ảnh hưởng nhiệt một cách chính xác, hạn chế biến dạng do nhiệt và giảm thiểu khuyết tật bề mặt (Tunna et al., 2001). Trên nền hợp kim nhôm, đặc biệt là 6061, các thử nghiệm với Nd:YAG (ở chế độ xung) đã chứng minh hiệu quả rõ rệt trong việc điều chỉnh vi cấu trúc và cải thiện đặc trưng bề mặt (Choi et al., 2012; Yin et al., 2021).

Nguyên lý cốt lõi của phương pháp đánh bóng bằng laser (LP) dựa trên hiện tượng nóng chảy cục bộ của các mấp mô bề mặt, kết hợp với hiệu ứng dòng chảy do sức căng bề mặt để tái tạo lớp phủ đồng nhất. Hiệu quả của quá trình này phụ thuộc mật thiết vào sự tương tác nhiệt động và kiểm soát độ chồng lấn. Theo các nghiên cứu điển hình (Krishnan & Fang, 2019), công suất (P), tốc độ quét (v) và tần số xung (f) là những tham số then chốt quyết định độ nhám sau gia công. Thực nghiệm cho thấy rằng, dưới các điều kiện thông số thích hợp, độ nhám bề mặt trung bình của một số vật liệu kim loại có thể giảm hơn 80% (Bordatchev et al., 2014). Đặc biệt, đối với các chi tiết in 3D từ hợp kim nhôm (SLM/DED), việc sử dụng nguồn xung không chỉ giúp giảm chi số  $S_a$  tới 88% mà còn hỗ trợ chuyển đổi trạng thái ứng suất dư sang trung tính hoặc ứng suất nén (Bhaduri et al., 2021). Ngoài ra, các mô hình hiện đại cũng khẳng định vai trò của tần số

xung cao và chiến lược quét đa lớp trong việc ổn định dòng chảy nhiệt và định hướng cấu trúc bề mặt (Hofele et al., 2021).

Các nghiên cứu về tiền xử lý hợp kim nhôm 6061 bằng laser Nd:YAG (như chiếu xạ trước khi phủ  $SiO_2$ ) đã chỉ ra rằng mật độ năng lượng và phân bố nhiệt đóng vai trò quyết định đến nhiệt và động học dòng chảy (Yin et al., 2021). Ngoài ra, việc kiểm soát trường nhiệt vi mô chính là yếu tố then chốt để tối ưu hóa các đặc tính bề mặt như khả năng thấm ướt và chống ăn mòn (Zhou et al., 2025). Mặc dù ba tham số P, v và f được xác định là những nhân tố cốt lõi chi phối chu trình nóng chảy – đông đặc và độ nhám Ra, nhưng các nghiên cứu hiện nay vẫn chưa khai thác triệt để sự tương tác giữa chúng thông qua các mô hình thiết kế thí nghiệm (DOE) của hệ thống. So với các vật liệu như thép hay titan, dữ liệu về phương pháp LP trên nhôm 6061 vẫn còn khá rời rạc, đặc biệt là thiếu những phân tích sâu về vai trò của tần số xung trong việc điều phối hiện tượng chồng lớp nhiệt (Krishnan & Fang, 2019).

Nghiên cứu này tập trung vào hai mục tiêu chính: (i) đánh giá các tương tác giữa công suất (P), tốc độ quét (v) và tần số xung (f) của laser Nd:YAG trong quá trình đánh bóng bằng laser trên hợp kim nhôm 6061 và (ii) xây dựng mô hình dự đoán độ nhám bề mặt Ra dựa trên mạng nơ-ron nhiều lớp (MLP), cho phép dự đoán độ nhám bề mặt theo hai phương x và y, lần lượt là  $R_{ax}$  và  $R_{ay}$  từ tổ hợp các thông số đầu vào.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Bố trí thí nghiệm và vật liệu

Các thí nghiệm được tiến hành trên máy laser xung 30 W, với nguồn laser sợi quang MFP-30X-NABBA4.3, Maxphotonics có bước sóng 1070 nm, độ rộng xung 100 ns và thấu kính hội tụ có tiêu cự 110 mm với đường kính chùm tia tại tiêu điểm 30  $\mu$ m trên bề mặt. Mẫu thí nghiệm là hợp kim nhôm 6061 dạng tấm (kích thước 250  $\times$  30  $\times$  3 mm). Quá trình đánh bóng được thực hiện với các thông số đầu vào là công suất laser (P), tốc độ quét (v) và tần số xung (f). Mỗi thông số có 3 mức giá trị trình bày trong Bảng 1.

**Bảng 1. Thông số laser trong thí nghiệm**

Thông số	Mức		
	1	2	3
P (W)	10	15	20
f (kHz)	35	40	45
v (mm/s)	600	800	1000

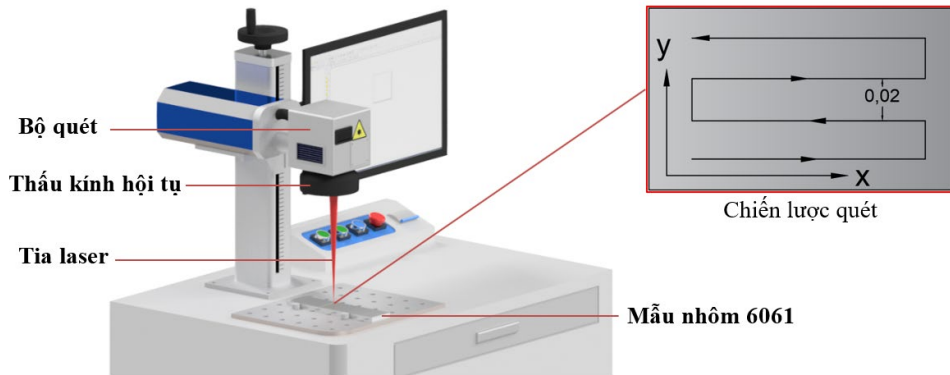
Tổng cộng 27 tổ hợp thí nghiệm được bố trí theo phương pháp thiết kế thí nghiệm đầy đủ. Các bộ thông số và kết quả thu được từ các thí nghiệm được tổng hợp và trình bày trong Bảng 2.

**Bảng 2. Các tổ hợp thông số laser và kết quả độ nhám bề mặt Rax, Ray**

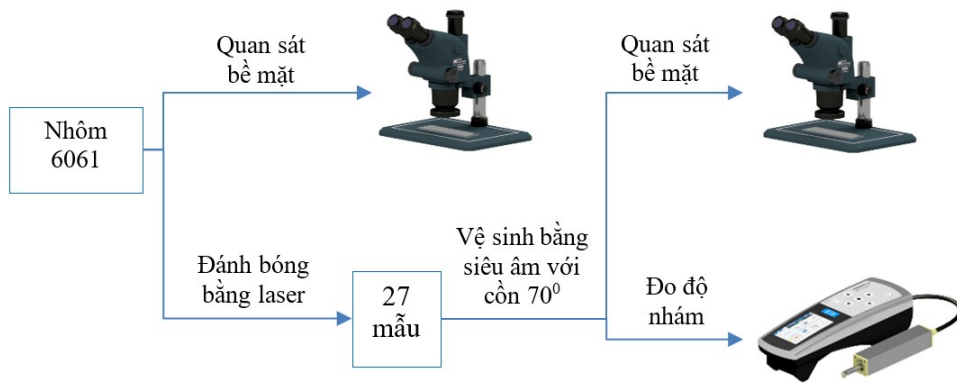
Thứ tự	Thông số đầu vào			Chất lượng đầu ra	
	Công suất, P (W)	Tần số xung, f (kHz)	Tốc độ quét, v (mm/s)	Độ nhám bề mặt, Rax (µm)	Độ nhám bề mặt, Ray (µm)
1	10	35	600	2,167	1,658
2	10	35	800	2,251	1,655
3	10	35	1000	2,227	1,725
4	10	40	600	2,169	1,443
5	10	40	800	2,237	1,913
6	10	40	1000	2,243	1,942
7	10	45	600	2,217	2,090
8	10	45	800	2,210	1,951
9	10	45	1000	2,287	1,792
10	15	35	600	2,364	1,902
11	15	35	800	2,116	1,985
12	15	35	1000	2,181	1,965
13	15	40	600	2,508	2,058
14	15	40	800	2,146	2,029
15	15	40	1000	2,176	1,749
16	15	45	600	2,420	2,173
17	15	45	800	2,242	1,878
18	15	45	1000	2,229	1,911
19	20	35	600	2,634	2,607
20	20	35	800	2,214	2,233
21	20	35	1000	2,169	2,015
22	20	40	600	2,511	2,595
23	20	40	800	2,328	2,320
24	20	40	1000	2,110	2,116
25	20	45	600	2,532	2,621
26	20	45	800	2,241	2,190
27	20	45	1000	2,128	2,063

Thí nghiệm được tiến hành trên vùng đánh bóng 25 x 15 mm. Để đảm bảo tính khách quan và nhất quán của dữ liệu, điều kiện hội tụ chùm tia, bước quét và số lượt quét (đơn lượt) được duy trì cố định cho tất cả các mẫu. Sơ đồ bố trí thiết bị chi tiết được minh họa tại Hình 1. Sau quy trình đánh bóng bằng laser, các mẫu được tẩy rửa bằng cồn 70° trong bể siêu âm trong 10 phút để loại bỏ hoàn toàn các tạp

chất bề mặt. Chỉ số độ nhám Ra được xác định bằng máy đo Accretech Handysurf+ theo tiêu chuẩn ISO 4287/ISO 4288. Để tăng độ tin cậy, mỗi mẫu được đo theo hai phương vuông góc (x và y), với ba vị trí đo lặp lại trên mỗi phương. Giá trị Ra trung bình thu được từ các phép đo này là thông số đầu ra phục vụ cho quá trình phân tích. Tổng thể quy trình thực nghiệm và đánh giá kết quả được tóm lược tại Hình 2.



Hình 1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm cùng các thành phần thiết bị liên quan



Hình 2. Sơ đồ tổng thể của thí nghiệm và phương pháp đánh giá kết quả đầu ra

## 2.2. Phương pháp Multilayer Perceptron neural network

Mạng nơ-ron nhân tạo đa lớp (Multilayer Perceptron - MLP) (Aitkin & Rob, 2003) được ứng dụng để xây dựng mô hình dự đoán độ nhám bề mặt Ra của mẫu sau quá trình đánh bóng bằng laser. Mô hình sử dụng ba thông số công nghệ đầu vào gồm: công suất laser (P), tần số xung (f) và tốc độ quét (v). Là một kiến trúc mạng truyền thẳng (feedforward), MLP bao gồm lớp đầu vào, các lớp ẩn với các nơ-ron xử lý phi tuyến và lớp đầu ra cung cấp giá trị dự đoán. Trong các lớp ẩn, các hàm kích hoạt phi tuyến như ReLU, tanh hoặc Sigmoid được tích hợp nhằm mô hình hóa mối quan hệ phức tạp giữa các thông số công nghệ và chất lượng bề mặt.

Quy trình xây dựng mô hình được thực hiện tuần tự để mô tả sự tương tác giữa các thông số laser và độ nhám bề mặt (Rax và Ray) của hợp kim nhôm 6061. Trước tiên, dữ liệu thực nghiệm được chuẩn hóa để đảm bảo tính đồng nhất về thang đo giữa các biến đầu vào. Sau đó, tập dữ liệu được phân chia thành tập huấn luyện (80%) và tập kiểm tra (20%); trong đó 15% dữ liệu huấn luyện được sử dụng làm

tập xác thực (validation) nhằm đánh giá khách quan khả năng tổng quát hóa của mô hình. Cấu trúc mạng (số lớp ẩn, số nơ-ron) và các siêu tham số (hyperparameters) được xác định thông qua quá trình thử nghiệm, hiệu chỉnh và đánh giá độ chính xác dựa trên các chỉ số sai số, đảm bảo mô hình đạt độ chính xác tối ưu.

Để hạn chế hiện tượng quá khớp (overfitting), ba cơ chế được áp dụng trong quá trình huấn luyện: (i) sử dụng phương pháp chuẩn hóa L2 (L2 regularization) để kiểm soát độ lớn của các trọng số; (ii) áp dụng dừng sớm (early stopping) với tập xác thực nhằm dừng quá trình học khi mô hình bắt đầu suy giảm khả năng tổng quát hóa và (iii) bổ sung nhiễu Gauss (Gaussian noise) có biên độ nhỏ vào dữ liệu huấn luyện, nhằm tăng tính đa dạng của dữ liệu (Zur et al., 2009; Ying, 2019). Hiệu suất của mô hình được đánh giá thông qua hệ số xác định ( $R^2$ ) và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE) trên tập kiểm tra.

Quy trình huấn luyện mạng MLP trong nghiên cứu này bao gồm hai giai đoạn chính: lan truyền tiến (forward propagation) và lan truyền ngược

(backpropagation). Trong giai đoạn lan truyền tiến, mỗi nơ-ron tại lớp ẩn và lớp đầu ra thực hiện tính toán tổng có trọng số của các tín hiệu đầu vào kết hợp với hệ số bias theo biểu thức (1).

$$z_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_i + b_j \quad (1)$$

Trong đó  $\omega_{ij}$  là trọng số liên kết giữa nơ-ron thứ  $i$  và nơ-ron thứ  $j$ ,  $x_i$  là giá trị đầu vào, và  $b_j$  là hệ số bias. Giá trị  $z_j$  sau đó được đưa qua hàm kích hoạt  $f(\cdot)$  để thu được đầu ra của nơ-ron theo công thức (2).

$$a_j = f(z_j) \quad (2)$$

Giá trị dự đoán của mô hình  $y_{pred}$  được so sánh với giá trị thực nghiệm  $y_{true}$  nhằm xác định sai số tại lớp đầu ra  $\delta_{output}$  theo công thức (3).

$$\delta_{output} = y_{pred} - y_{true} \quad (3)$$

Trong giai đoạn lan truyền ngược, sai số này được truyền ngược qua các lớp của mạng để tính gradient của hàm mất mát  $L$ , trong đó hàm Mean Squared Error (MSE) được sử dụng làm hàm mất mát. Các trọng số và bias của mạng được cập nhật theo thuật toán Adam (Adaptive Moment Estimation) – một phương pháp tối ưu hóa dựa trên gradient kết hợp ý tưởng của Momentum và RMSprop nhằm cải thiện tốc độ hội tụ và độ ổn định của quá trình huấn luyện.

Tại bước lặp thứ  $t$ , Adam tính toán moment bậc nhất và bậc hai của gradient (4) và (5).

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \quad (4)$$

$$v_t = \beta_2 v_t + (1 - \beta_2) g_t^2 \quad (5)$$

Trong đó  $g_t = \frac{\partial L}{\partial w_{ij}}$  là gradient của hàm mất mát đối với tham số cần cập nhật.

Để giảm sai lệch do khởi tạo ban đầu, các moment được hiệu chỉnh bias theo (6) và (7).

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \quad (6)$$

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (7)$$

Các tham số được cập nhật theo công thức (8) và (9).

$$\omega_{ij}^{new} = \omega_{ij}^{old} - \eta \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t} + \epsilon} \quad (8)$$

$$b_j^{new} = b_j^{old} - \eta \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t} + \epsilon} \quad (9)$$

Trong đó  $\eta$  là tốc độ học (learning rate),  $\beta_1$  và  $\beta_2$  là các hệ số suy giảm của moment bậc nhất và bậc hai, và  $\epsilon$  là một hằng số rất nhỏ nhằm tránh phép chia cho 0.

Sai số và trung bình sai số của mô hình dự đoán được xác định theo công thức (10) và (11).

$$\text{Sai số} = \frac{|y_{thực} - y_{dự\ đoán}|}{y_{thực}} \cdot 100(\%) \quad (10)$$

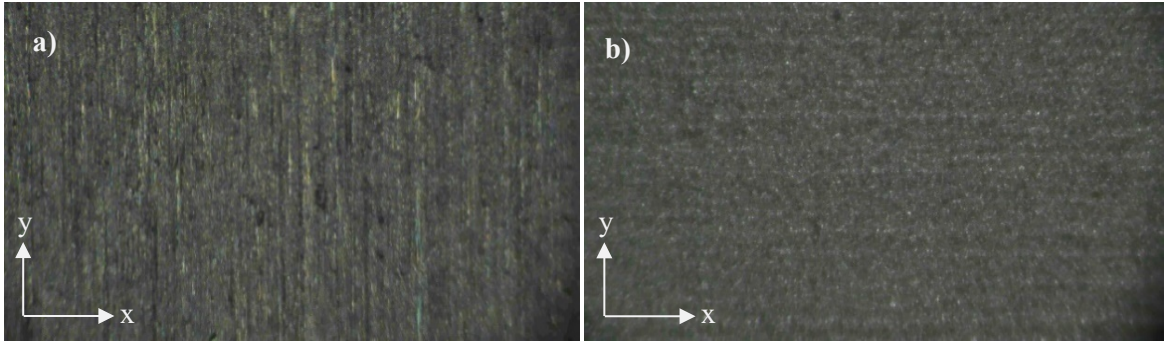
$$\text{Trung bình sai số} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{sai số}}{n} \quad (11)$$

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Đặc điểm hình thái và biên dạng độ nhám bề mặt

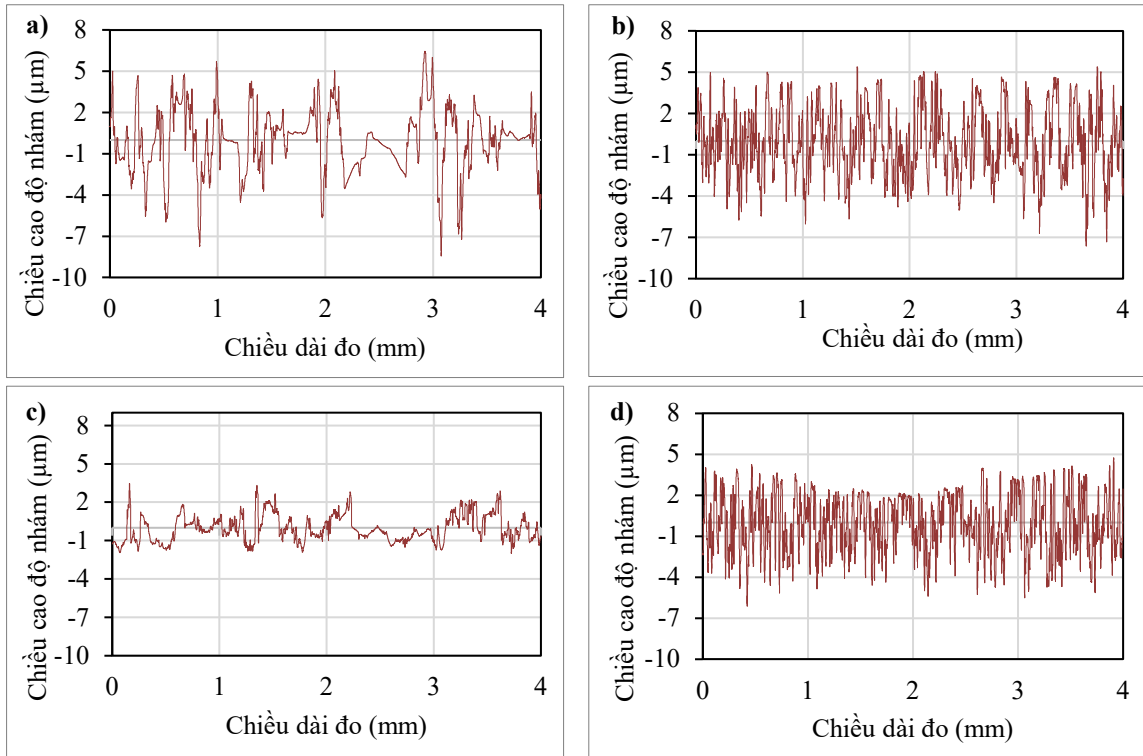
Kết quả được trình bày ở Hình 3 cho thấy hình ảnh hiển vi quang học của bề mặt mẫu trước (Hình 3a) và sau khi đánh bóng bằng laser (Hình 3b) với các thông số:  $P = 10 \text{ W}$ ,  $f = 45 \text{ kHz}$  và  $v = 1000 \text{ mm/s}$ . Kết quả cho thấy bề mặt sau xử lý trở nên đồng đều rõ rệt, cấu trúc vi hình thái có tính liên tục cao và các khuyết tật cục bộ giảm đáng kể so với trạng thái ban đầu.

Đặc điểm này được minh họa cụ thể qua biểu đồ biên dạng bề mặt tại Hình 4. Sau khi đánh bóng (Hình 4b và 4d), đường biên dạng theo cả hai phương  $x$  và  $y$  cho thấy sự phân bố đỉnh–thung lũng đồng nhất hơn so với mẫu đối chứng (Hình 4a và 4c). Sự biến thiên độ cao đã được điều hòa trên toàn bộ bề mặt thay vì tập trung cục bộ. Hiện tượng này phản ánh cơ chế tái phân bố vật liệu trong quá trình nóng chảy và tái đông đặc dưới tác động của laser, giúp cải thiện tính đồng nhất hình thái mà không làm thay đổi đáng kể biên độ tổng thể của bề mặt.



**Hình 3. Ảnh hiển vi quang học bề mặt mẫu**

Ghi chú: (a) Trước khi đánh bóng; (b) Sau khi đánh bóng ( $P = 10\text{ W}$ ,  $f = 45\text{ kHz}$ ,  $v = 1000\text{ mm/s}$ )



**Hình 4. Biên dạng bề mặt theo chiều dài đo**

Ghi chú: a) Phương x trước khi đánh bóng; b) Phương x sau khi đánh bóng ( $P = 10\text{ W}$ ,  $f = 45\text{ kHz}$ ,  $v = 1000\text{ mm/s}$ ); c) Phương y trước khi đánh bóng; d) Phương y sau khi đánh bóng ( $P = 10\text{ W}$ ,  $f = 45\text{ kHz}$ ,  $v = 1000\text{ mm/s}$ )

### 3.2. Phân tích ANOVA ảnh hưởng của các thông số

Kết quả phân tích phân tích phương sai (ANOVA) (Bảng 3 và Bảng 4) cho thấy độ nhám bề mặt theo hai phương Rax và Ray chịu ảnh hưởng đáng kể bởi các thông số laser. Trong đó, công suất laser (P) và tốc độ quét (v) là hai yếu tố có ý nghĩa thống kê ( $p\text{-value} < 0,05$ ). Đối với Rax, tốc độ quét (v) đóng vai trò chi phối chính; bên cạnh đó, công suất laser và đặc biệt là tương tác P-v cũng ảnh

hưởng lớn đến việc điều chỉnh độ nhám. Đối với độ nhám theo phương y (Ray), kết quả ANOVA chỉ ra rằng công suất laser (P) là yếu tố có mức độ ảnh hưởng lớn nhất, bên cạnh tác động đáng kể của tốc độ quét (v) và hiệu ứng tương tác P-v. Tần số xung (f) không thể hiện ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê trong phạm vi nghiên cứu này, điều này được cho là liên quan đến khoảng giá trị khảo sát của tham số còn tương đối hẹp. Trong phạm vi khảo sát này, sự thay đổi của tần số chỉ làm thay đổi nhỏ năng lượng

của từng xung laser cũng như mật độ xung trên bề mặt, do đó không tạo ra sự khác biệt đáng kể trong quá trình hình thành và động học của lớp kim loại nóng chảy.

Biểu đồ tương tác P-v trong Hình 5a cho thấy tại mỗi mức công suất, sự thay đổi tốc độ quét dẫn đến biến thiên rõ rệt của Rax, đồng thời mức độ ảnh hưởng của v phụ thuộc mạnh vào giá trị P, khẳng định sự tồn tại của hiệu ứng tương tác giữa hai thông số này. Xu hướng giảm độ nhám bề mặt Rax khi tốc độ quét tăng tại mức công suất  $P = 15 \text{ W}$  và  $P = 20 \text{ W}$  có thể được giải thích dựa trên cơ chế truyền nhiệt và động lực học của lớp kim loại nóng chảy trong quá trình đánh bóng bằng laser. Ở mức công suất này, năng lượng laser đủ để tạo ra một lớp kim loại nóng chảy mỏng trên bề mặt nhôm. Khi tốc độ quét tăng, thời gian tương tác giữa chùm laser và bề mặt vật liệu giảm, nhờ đó hạn chế sự tích tụ nhiệt và tránh hiện tượng nóng chảy quá mức. Điều này giúp duy trì lớp nóng chảy có độ dày nhỏ và ổn định. Trong lớp kim loại nóng chảy này, sự chênh lệch nhiệt độ trên bề mặt tạo ra gradient sức căng bề mặt, từ đó hình thành dòng chảy Marangoni. Dòng chảy này thúc đẩy kim loại nóng chảy di chuyển từ các đỉnh nhám sang các vùng lõm, làm tái phân bố vật liệu trên bề mặt. Sau khi lớp kim loại nóng chảy đông đặc trở lại, bề mặt trở nên đồng đều hơn và độ nhám Ra giảm. (Zhang et al., 2017).

Ngược lại, khi  $P = 10 \text{ W}$ , năng lượng không đủ để hình thành lớp nóng chảy ổn định. Khi tốc độ quét

tăng, mật độ năng lượng cung cấp cho bề mặt giảm, làm suy giảm quá trình nóng chảy và tái phân bố vật liệu, dẫn đến hiệu ứng làm phẳng kém hiệu quả và độ nhám có xu hướng tăng nhẹ. Xu hướng tương tự cũng được quan sát đối với Ray trong Hình 5b, nơi sự thay đổi của tốc độ quét tại các mức công suất khác nhau cho thấy ảnh hưởng không đồng nhất. Qua đó cho thấy rằng việc tối ưu hóa chất lượng bề mặt cần xem xét đồng thời tác động tương tác giữa các thông số.

Sự khác biệt về mức độ ảnh hưởng của các thông số đối với Rax và Ray chủ yếu xuất phát từ đặc trưng hướng quét và cơ chế truyền năng lượng. Theo phương x (hướng quét), độ nhám Rax chịu sự chi phối chủ yếu của tốc độ quét (v). Thông số này trực tiếp quyết định thời gian tương tác và mật độ năng lượng phân bố dọc theo vết quét; trong khi đó, công suất (P) đóng vai trò hỗ trợ thông qua hiệu ứng tương tác P-v.

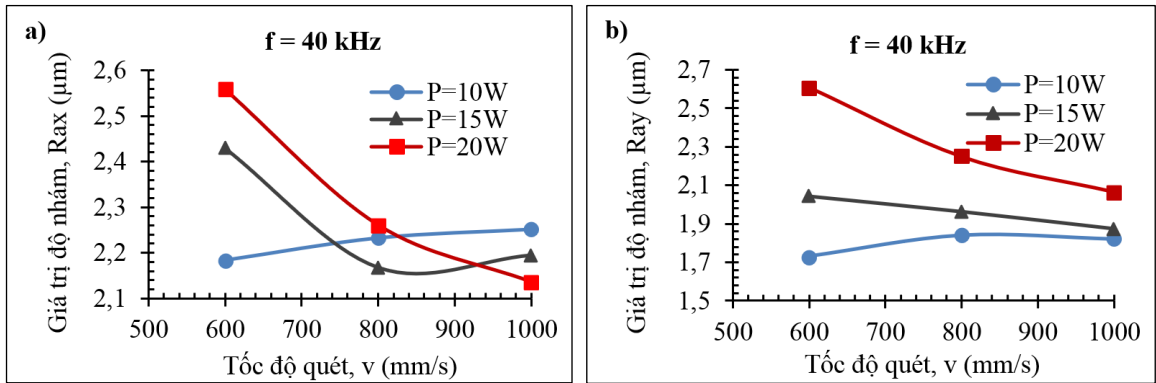
Ngược lại, theo phương y (vuông góc với hướng quét), độ nhám Ray phụ thuộc mật thiết vào công suất laser (P), phản ánh quá trình lan truyền nhiệt và dòng chảy vật liệu theo phương ngang, còn tốc độ quét (v) chỉ đóng vai trò thứ yếu. Sự nhất quán giữa kết quả ANOVA và các biểu đồ tương tác khẳng định rằng quá trình đánh bóng bằng laser được kiểm soát cốt yếu bởi sự hiệp biến giữa công suất laser và tốc độ quét.

**Bảng 3. Kết quả phân tích ANOVA cho độ nhám theo phương x (Rax)**

Yếu tố	SS	df	Đóng góp	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p
Công suất, P	0,0412	2	8,2330%	0,0206	6,2424	0,0233
Tần số xung, f	0,0019	2	0,3800%	0,0009	0,2838	0,7602
Tốc độ quét, v	0,2058	2	41,1270%	0,1029	31,1710	0,0002
Tương tác P-f	0,0109	4	2,1780%	0,0027	0,8220	0,5462
Tương tác P-v	0,2104	4	42,0460%	0,0526	15,9278	0,0007
Tương tác f-v	0,0038	4	0,7590%	0,0009	0,2846	0,8800
Sai số	0,0264	8	5,2760%	0,0033		
Tổng	0,5004	26	100%			

**Bảng 4. Kết quả phân tích ANOVA cho độ nhám theo phương y (Ray)**

Yếu tố	SS	df	Đóng góp	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p
Công suất, P	1,2201	2	57,4520%	0,6101	31,1324	0,0002
Tần số xung, f	0,0476	2	2,2410%	0,0238	1,2136	0,3465
Tốc độ quét, v	0,1943	2	9,1490%	0,0972	4,9583	0,0398
Tương tác P-f	0,0713	4	3,3570%	0,0178	0,9101	0,5022
Tương tác P-v	0,3270	4	15,3980%	0,0818	4,1719	0,0408
Tương tác f-v	0,1066	4	5,0200%	0,0267	1,3602	0,3287
Sai số	0,1568	8	7,3830%	0,0196		
Tổng	2,1237	26	100%			



**Hình 5. Ảnh hưởng của các thông số laser đến độ nhám bề mặt**

Ghi chú: a) Độ nhám theo phương x (Ra<sub>x</sub>); b) Độ nhám theo phương y (Ra<sub>y</sub>)

### 3.3. Mô hình dự đoán độ nhám bề mặt MLP

Trong nghiên cứu này, hai mô hình mạng nơ-ron truyền thẳng đa lớp (MLP) độc lập đã được xây dựng nhằm dự đoán độ nhám bề mặt theo hai phương Rax và Ray. Độ chính xác dự đoán của mô hình được đánh giá thông qua hệ số xác định ( $R^2$ ) và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE) trên tập kiểm tra.

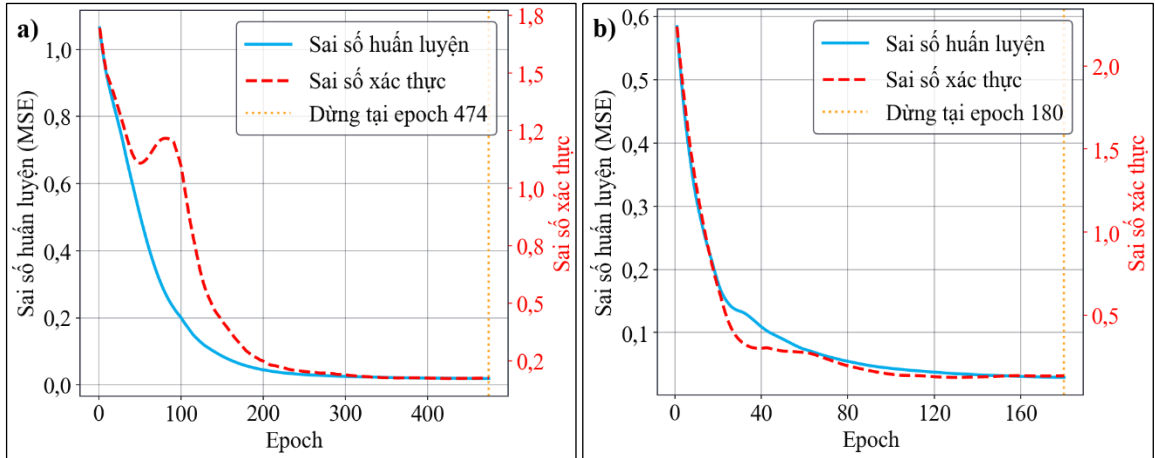
Về cấu trúc mạng, mô hình dự đoán Rax sử dụng kiến trúc hai lớp ẩn với 17 và 4 nơ-ron, trong khi mô hình dự đoán Ray gồm hai lớp ẩn với 11 và 6 nơ-ron. Các lớp ẩn sử dụng hàm kích hoạt ReLU. Đối với mô hình Rax, các tham số chính bao gồm tốc độ học  $\eta = 0,00268$ , hệ số điều chuẩn  $L2 = 0,024$ , tỷ lệ dữ liệu xác thực (validation) 0,15 và số epoch chờ (patience) 50 epoch. Mô hình Ray được huấn luyện với tốc độ học  $\eta = 0,0067$  và hệ số điều chuẩn  $L2 = 0,0685$  cùng các tham số dừng sớm tương ứng với mô hình Rax.

Kết quả định lượng cho thấy mô hình MLP dự đoán Rax đạt hệ số xác định  $R^2 = 0,964$  và sai số

phần trăm tuyệt đối trung bình MAPE = 0,994%. Trong khi đó, mô hình dự đoán Ray đạt  $R^2 = 0,961$  và MAPE = 2,531%, cho thấy khả năng dự đoán tốt đối với cả hai đại lượng độ nhám bề mặt. Kết quả dự đoán được tổng hợp trong Bảng 5, sự so sánh giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán cho thấy sai số rất nhỏ trên hầu hết các mẫu thử. Quá trình học của mô hình được thể hiện thông qua đường học (learning curve) trong Hình 6. Sai số huấn luyện giảm nhanh ở các epoch đầu và dần ổn định khi số vòng lặp tăng lên, cho thấy quá trình huấn luyện đạt trạng thái hội tụ. Sai số xác thực cũng có xu hướng tương tự và duy trì ở mức gần với sai số huấn luyện, cho thấy mô hình không xuất hiện dấu hiệu quá khớp đáng kể. Biểu đồ phần dư cho thấy các sai số phân bố ngẫu nhiên xung quanh đường trung tâm (Hình 7), cho thấy mô hình không tồn tại sai lệch có hệ thống (systematic bias) và duy trì khả năng khái quát hóa tốt. Biểu đồ hồi quy giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm (Hình 8) cho thấy các điểm dữ liệu phân bố gần đường  $y = x$ . Sự chênh lệch nhỏ giữa kết quả trên tập huấn luyện và tập kiểm tra cho thấy mô hình có khả năng khái quát hóa tốt.

**Bảng 5. Kết quả dự đoán của mô hình và giá trị thực nghiệm**

Mẫu	P (W)	f (kHz)	v (mm/s)	Giá trị dự đoán ( $\mu\text{m}$ )		Giá trị thực nghiệm ( $\mu\text{m}$ )		Sai số (%)	
				Rax	Ray	Rax	Ray	Rax	Ray
1	10	45	1000	2,153	1,605	2,167	1,658	0,660	3,213
2	15	40	800	2,260	1,868	2,287	1,792	1,165	4,232
3	15	35	600	2,353	1,903	2,364	1,902	0,478	0,027
4	20	40	600	2,195	1,865	2,181	1,965	0,637	5,085
5	10	35	600	2,186	1,986	2,146	2,029	1,851	2,119
6	15	35	1000	2,540	2,582	2,511	2,595	1,171	0,509
<b>Trung bình</b>								<b>0,994</b>	<b>2,531</b>

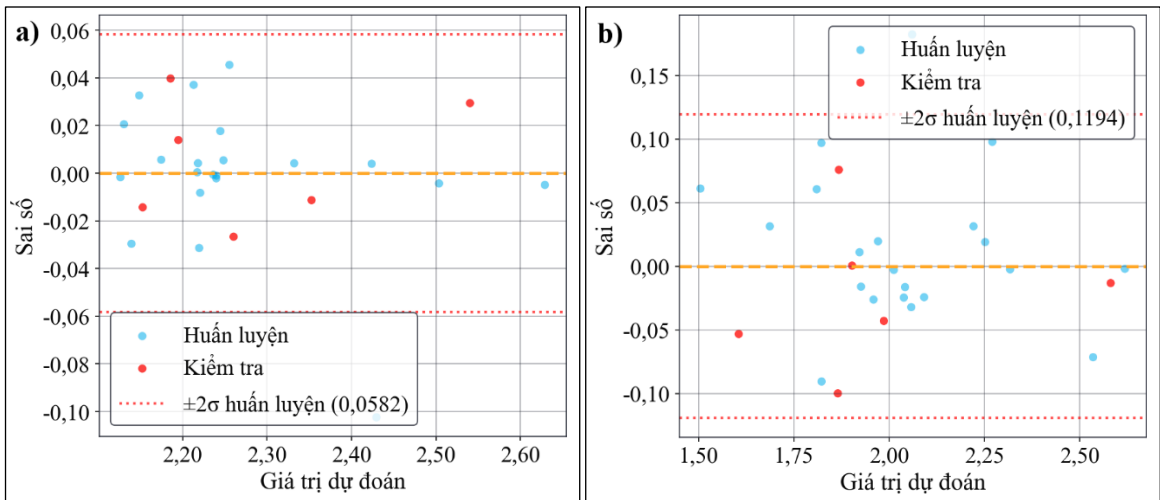


**Hình 6. Biểu đồ đường hội tụ sai số huấn luyện và sai số xác thực của mô hình MLP**

Ghi chú: a) Mô hình MLP của Rax; b) Mô hình MLP của Ray

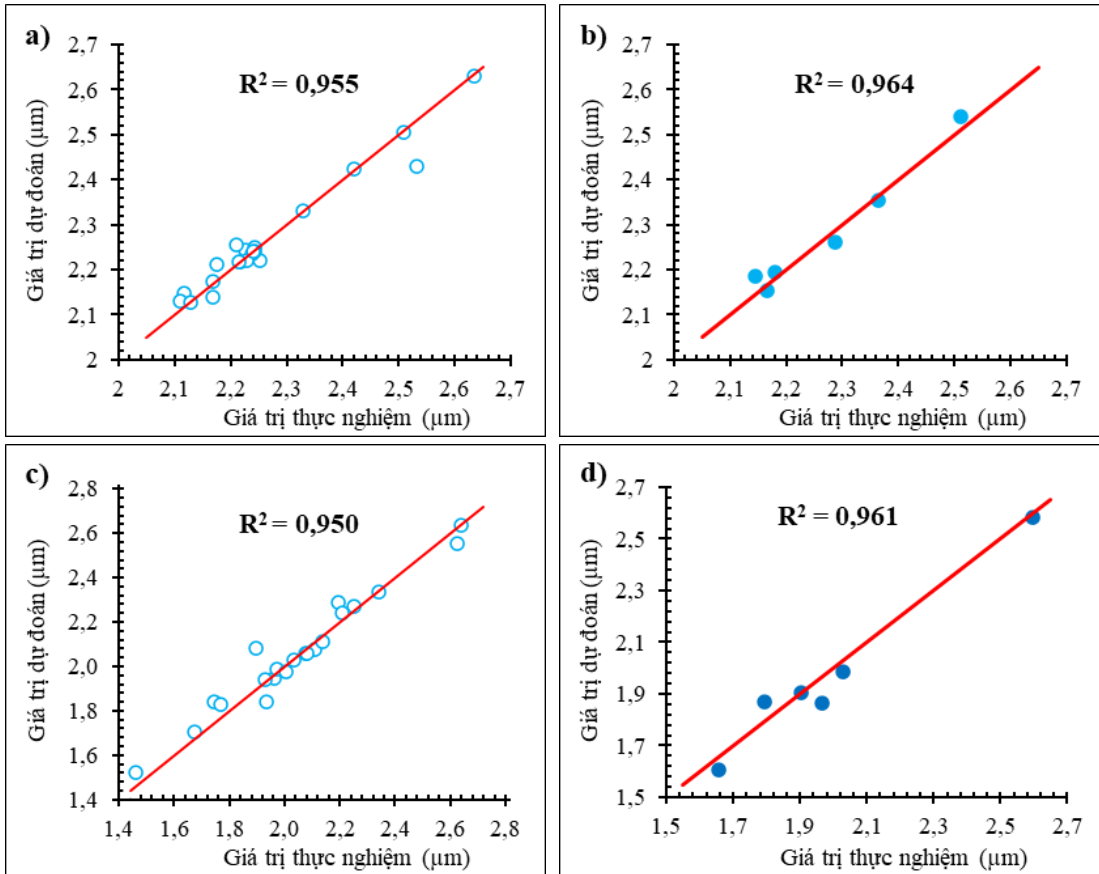
Sự khác biệt về cấu trúc giữa hai mô hình phản ánh bản chất phi tuyến không đồng nhất trong mối quan hệ giữa các thông số laser và độ nhám bề mặt theo từng phương đo. Kết quả này khẳng định tính tất yếu của việc thiết lập các mạng MLP riêng biệt; bởi lẽ, một cấu trúc mạng chung khó có thể mô tả toàn diện các đặc trưng vật lý và hành vi biến thiên đặc thù của độ nhám theo từng hướng đo khác nhau.

Chỉ số thống kê từ biểu đồ khẳng định độ chính xác cao và khả năng khái quát hóa tốt của các mô hình MLP trên tập dữ liệu kiểm chứng độc lập. Điều này cho thấy tính ưu việt của mô hình trong việc mô phỏng độ nhám bề mặt sau quá trình đánh bóng bằng laser. Các mô hình MLP được đề xuất không chỉ dự đoán chính xác chất lượng bề mặt mà còn đóng vai trò là nền tảng đáng tin cậy cho các nghiên cứu tối ưu hóa thông số công nghệ trong tương lai.



**Hình 7. Biểu đồ phân dư của mô hình MLP**

Ghi chú: a) Giá trị của Rax; b) Giá trị của Ray



**Hình 8. Biểu đồ hồi quy giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán của mô hình MLP**

Ghi chú: a) Giá trị của Rax trên tập huấn luyện; b) Giá trị của Rax trên tập kiểm tra; c) Giá trị của Ray trên tập huấn luyện; d) Giá trị của Ray trên tập kiểm tra

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khảo sát một cách hệ thống ảnh hưởng của các tham số quá trình chính - bao gồm công suất laser (P), tốc độ quét (v) và tần số xung (f) đến chất lượng bề mặt hợp kim nhôm 6061 trong quá trình đánh bóng bằng laser Nd:YAG xung. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho thấy độ nhám theo phương quét (Rax) chịu ảnh hưởng mạnh nhất bởi tốc độ quét, kế đến là công suất laser và tương tác P-v. Ngược lại, độ nhám theo phương vuông góc (Ray) lại bị chi phối chủ yếu bởi công suất laser, sau đó là tốc độ quét và sự tương tác giữa hai thông số này. Tần số xung (f) không thể hiện ảnh hưởng đến cả Rax và Ray.

Sự khác biệt này phản ánh cơ chế hình thành độ nhám bề mặt có tính hướng: trong khi Rax bị chi phối bởi mật độ năng lượng dọc theo quỹ đạo quét, thì Ray lại chịu tác động chủ yếu từ quá trình lan truyền nhiệt ngang và tính ổn định của bề nóng chảy dưới ảnh hưởng của dòng chảy Marangoni. Bên

cạnh đó, mô hình dự đoán độ nhám dựa trên mô hình MLP đã thể hiện hiệu năng ưu việt với hệ số xác định  $R^2$  cao ( $R^2 = 0,964$  cho Rax và  $R^2 = 0,961$  cho Ray) và sai số dự đoán thấp (trung bình cho Rax là 0,994% và 2,531% cho Ray) trên tập dữ liệu kiểm tra. Những kết quả này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc tối ưu hóa thông số công nghệ đánh bóng laser hợp kim nhôm 6061, đồng thời tạo tiền đề cho các nghiên cứu mở rộng về khoảng cách quét (hatch spacing) hoặc ảnh hưởng của khí bảo vệ nhằm nâng cao chất lượng xử lý bề mặt.

#### LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn phòng thí nghiệm Cơ học vật liệu và phòng thí nghiệm Máy và thiết bị chế biến LT-TP, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ đã tạo điều kiện thuận lợi về cơ sở vật chất và chuyên môn trong suốt quá trình để thực hiện nghiên cứu này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Aitkin, M., & Rob, F. (2003). Statistical modelling of artificial neural networks using the multi-layer perceptron. *Statistics and Computing*, 13(3), 227-239.  
<https://doi.org/10.1023/A:1024218716736>
- Azarhoushang, B., Marinescu, I. D., Rowe, W. B., Dimitrov, B., & Ohmori, H. (2021). *Tribology and fundamentals of abrasive machining processes*. William Andrew.
- Bhaduri, D., Ghara, T., Penchev, P., Paul, S., Pruncu, C. I., Dimov, S., & Morgan, D. (2021). Pulsed laser polishing of selective laser melted aluminium alloy parts. *Applied Surface Science*, 558, 149887.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149887>
- Bordatchev, E. V., Hafiz, A. M., & Tutunea-Fatan, O. R. (2014). Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1), 35-52.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5761-3>
- Choi, S., Kim, C. S., Jhang, K. Y., & Shin, W. S. (2012). Surface characteristics of aluminum 6061-T6 subjected to Nd:YAG pulsed-laser irradiation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(7), 2163-2166.  
<https://doi.org/10.1007/s12206-012-0537-x>
- Dubey, A. K., & Yadava, V. (2008). Laser beam machining – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6), 609-628.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017>
- Gisario, A., Barletta, M., & Veniali, F. (2022). Laser polishing: A review of a constantly growing technology in the surface finishing of components made by additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3-4), 1433-1472.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08840-x>
- Hofele, M., Roth, A., Schanz, J., Neuer, J., Harrison, D. K., De Silva, A. K. M., & Riegel, H. (2021). Laser polishing of additive manufactured aluminium parts by modulated laser power. *Micromachines*, 12(11), 1332.  
<https://doi.org/10.3390/mi12111332>
- Krishnan, A., & Fang, F. (2019). Review on mechanism and process of surface polishing using lasers. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(3), 299-319.  
<https://doi.org/10.1007/s11465-019-0535-0>
- Manco, E., Cozzolino, E., & Astarita, A. (2022). Laser polishing of additively manufactured metal parts: A review. *Surface Engineering*, 38(3), 217-233.  
<https://doi.org/10.1080/02670844.2022.2072080>
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser material processing* (4th ed.). Springer London.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
- Tunna, L., Kearns, A., O'Neill, W., & Sutcliffe, C. J. (2001). Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths. *Optics & Laser Technology*, 33(3), 135-143.  
[https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(00\)00126-2](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(00)00126-2)
- Yin, J., Cao, Y., Cui, Y., Lu, L., Yan, Y., & Chen, J. (2021a). Nd:YAG laser ablation of aluminum alloy 6061 before and after silicon dioxide coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 877, 160329.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160329>
- Ying, X. (2019). An overview of overfitting and its solutions. In *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1168, No. 2, p. 022022). IOP Publishing.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/2/022022>
- Zhang, C., Zhou, J., & Shen, H. (2017). Role of capillary and thermocapillary forces in laser polishing of metals. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(4), 041019.  
<https://doi.org/10.1115/1.4035468>
- Zhou, J., Wu, J., Tang, S., & Li, Y. (2025). Review of laser texturing technology for surface protection and functional regulation of aluminum alloys: Wettability, anti-icing, corrosion resistance, and wear resistance. *Coatings*, 15(5), 567.  
<https://doi.org/10.3390/coatings15050567>
- Zur, R. M., Jiang, Y., Pesce, L. L., & Drukker, K. (2009). Noise injection for training artificial neural networks: A comparison with weight decay and early stopping. *Medical physics*, 36(10), 4810-4818.  
<https://doi.org/10.1118/1.3213517>