

# TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU QUÁ TRÌNH PHAY HỢP KIM TITANIUM Ti-6Al-4V TRONG ĐIỀU KIỆN BÔI TRƠN TỐI THIỂU

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF Ti-6Al-4V ALLOY MILLING PROCESS UNDER MQL CONDITION

Nguyễn Văn Cảnh<sup>1</sup>, Nguyễn Thùy Dương<sup>2</sup>,  
Phạm Lê Việt Anh<sup>3</sup>, Hoàng Tiến Dũng<sup>1</sup>, Phạm Văn Hùng<sup>2,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.116>

## TÓM TẮT

Bài báo này so sánh phương pháp TOPSIS-Entropy với phương pháp hàm mong muốn (Desirability Function Approach-DFA) trong việc tối ưu quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V. Nghiên cứu tập trung vào xác định các thông số cắt tối ưu gồm vận tốc cắt  $V_c$  (m/ph), lượng chạy dao răng  $f_z$  (mm/răng), chiều sâu cắt  $a_p$  (mm) trong điều kiện bôi trơn tối thiểu (MQL) với tham số bôi trơn là áp suất dòng khí P (bar) và lưu lượng dầu bôi trơn Q (ml/h). Nghiên cứu bao gồm việc thực hiện thí nghiệm, phát triển mô hình dự đoán cho các đáp ứng (giá trị độ nhám  $R_a$ , tỉ lệ bóc tách vật liệu MRR và năng lượng cắt riêng  $U_c$ ), thực hiện phân tích phương sai (ANOVA) và xác định các thông số cắt tối ưu bằng phương pháp đạt đến mức mong muốn. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp DFA và TOPSIS-Entropy cho ra các giá trị tối ưu khác nhau. Phương pháp TOPSIS-Entropy xếp hạng 27 phương án thực nghiệm để tìm ra bộ thông số công nghệ tối ưu, trong khi DFA cung cấp 27 giá trị tối ưu hàng đầu dựa trên các giá trị mong muốn được tính toán từ các phương trình hồi quy. Việc so sánh phương pháp TOPSIS-Entropy và DFA cung cấp những hiểu biết quan trọng về việc tối ưu quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V. Việc lựa chọn phương pháp tối ưu phụ thuộc vào mục tiêu nghiên cứu và sự cân nhắc giữa chất lượng và hiệu suất của quá trình.

**Từ khóa:** Entropy, TOPSIS, tối ưu hóa đa mục tiêu, Ti-6Al-4V.

## ABSTRACT

This article compares the TOPSIS-Entropy method with the Desirability Function Approach (DFA) in optimizing the milling process of Ti-6Al-4V alloy. The study focuses on determining the optimal cutting parameters including cutting speed  $V_c$  (m/min), tooth feed  $f_z$  (mm/tooth), and cutting depth  $a_p$  (mm) under minimum quantity lubrication (MQL) conditions with lubrication parameters of air pressure P (bar) and oil flow rate Q (ml/h). The research involves experimental work, developing predictive models for the responses (surface roughness value  $R_a$ , material removal rate MRR, and specific cutting energy  $U_c$ ), performing analysis of variance (ANOVA), and determining the optimal cutting parameters using the desirability function approach. The research findings indicate that the DFA and TOPSIS-Entropy methods yield different optimal values. The TOPSIS-Entropy method ranks 27 experimental options to identify the optimal set of process parameters, while DFA provides the top 27 optimal values based on desired values computed from regression equations. Comparing the TOPSIS-Entropy and DFA methods provides important insights into optimizing the milling process of Ti-6Al-4V alloy. The choice of the optimization method depends on the research objectives and the trade-off between process quality and performance.

**Keywords:** Entropy, TOPSIS, Multiple Objective Optimization, Ti-6Al-4V.

<sup>1</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>3</sup>Công ty TNHH phần mềm FPT

\*Email: hung.phamvan@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/5/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/6/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/6/2023

## 1. GIỚI THIỆU

Quá trình tối ưu hóa các thông số cắt trong ngành công nghiệp gia công cơ khí là một mục tiêu quan trọng và hấp dẫn. Trong lĩnh vực gia công kim loại, việc tối ưu hóa quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V đặc biệt quan trọng, vì loại

hợp kim này được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như hàng không vũ trụ, y tế và ô tô. Để đạt được chất lượng và hiệu suất gia công tối ưu, các thông số cắt, vận tốc cắt  $V_c$  (m/phút), lượng chạy dao răng  $f_z$  (mm/răng), chiều sâu cắt  $a_p$  (mm) và lưu lượng dầu bôi trơn (Q), áp suất nguồn cấp khí (P), cần được điều chỉnh và tối ưu.

Các nghiên cứu trước đây đã tập trung vào việc tối ưu hóa các thông số cắt bằng cách sử dụng phương pháp hồi quy và phân tích ANOVA [1]. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu này chỉ tập trung vào việc tối ưu hóa một đáp ứng duy nhất, chẳng hạn như độ nhám bề mặt ( $R_a$ ) hoặc năng lượng cắt riêng ( $U_c$ ). Điều này có thể dẫn đến một quá trình tối ưu hóa không toàn diện và không đáp ứng được nhu cầu thực tế trong quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V. Nhiều nghiên cứu khác ứng dụng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM - Multi Criteria Decision Making [2]) như TOPSIS [3], MOORA, COPRAS, PARIS, AHP [4, 5]... để giải bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu, nhưng những phương pháp này vẫn còn nhiều hạn chế về việc tính toán và lựa chọn trọng số cho mỗi tiêu chí, hay hạn chế về tính toán giá trị tối ưu.

Trong nghiên cứu này, hai phương pháp tối ưu hóa là TOPSIS-Entropy [6-8] và Desirability Function Approach (DFA) [9-10] đã được sử dụng đồng thời và kết quả được so sánh, phân tích để đánh giá mức độ phù hợp cũng như khả năng ứng dụng của mỗi phương pháp trong tối ưu hóa quá trình gia công cắt gọt. Phương pháp TOPSIS-Entropy là một phương pháp đánh giá đa trọng số dựa trên sự cân bằng giữa lợi ích và rủi ro, trong khi DFA là một phương pháp định lượng mục tiêu đa đáp ứng. Mục tiêu của nghiên cứu là tìm ra các giá trị tối ưu của các vận tốc cắt  $V_c$  (m/ph), lượng chạy dao răng  $f_z$  (mm/răng), chiều sâu cắt  $a_p$  (mm)... trong quá trình phay bằng hợp kim Ti-6Al-4V dưới điều kiện bôi trơn bằng lượng dầu tối thiểu (MQL).

Quá trình tối ưu hóa được tiến hành bằng cách tiến hành thực nghiệm để thu thập dữ liệu, phát triển mô hình dự đoán cho các đáp ứng ( $R_a$ , MRR và  $U_c$ ), phân tích phương sai (ANOVA) và xác định các thông số cắt tối ưu bằng phương pháp đạt đến mức mong muốn. Ngoài ra, chúng tôi cũng đã phân tích các công trình nghiên cứu liên quan đã được công bố trong lĩnh vực tối ưu hóa quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V, để tạo ra một khung hiểu rõ ràng về nghiên cứu đã thực hiện và đóng góp của nghiên cứu mới này.

Kết quả nghiên cứu này sẽ cung cấp cái nhìn sâu sắc về hiệu quả và hiệu suất của hai phương pháp tối ưu hóa trong quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V. Kết quả tối ưu hóa được tính toán bởi phương pháp DFA và TOPSIS-Entropy sẽ được so sánh để đánh giá sự hiệu quả của từng phương pháp. Ngoài ra, chúng tôi cũng sẽ đánh giá sự ảnh hưởng của việc giảm chiều sâu cắt lên chất lượng bề mặt và năng suất cắt.

Qua việc phân tích các công trình nghiên cứu đã công bố, chúng tôi nhận thấy rằng trong lĩnh vực tối ưu hóa quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V, ít có nghiên cứu so sánh trực tiếp giữa phương pháp TOPSIS-Entropy và DFA. Do đó, nghiên cứu này đóng góp một góc nhìn mới và cung cấp thông tin quan trọng về lựa chọn phương pháp tối ưu hóa phù hợp cho quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V.

Bằng cách tiến hành các thí nghiệm và phân tích số liệu, chúng tôi hy vọng rằng kết quả của nghiên cứu này sẽ cung cấp sự hiểu biết sâu sắc về tối ưu hóa quá trình phay

hợp kim Ti-6Al-4V và tạo ra cơ sở cho việc cải tiến hiệu suất và chất lượng trong ngành công nghiệp gia công kim loại.

## 2. PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU HÓA

Trong nghiên cứu này, hai phương pháp tối ưu hóa khác nhau là TOPSIS kết hợp trọng số Entropy và phương pháp hàm mong muốn DFA sẽ được sử dụng và so sánh nhằm đánh giá ưu nhược điểm và mức độ phù hợp của mỗi phương pháp trong tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V trong điều kiện bôi trơn tối thiểu.

### 2.1. Phương pháp TOPSIS kết hợp trọng số Entropy

Phương pháp TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) [11] là một phương pháp phổ biến được sử dụng trong bài toán ra quyết định đa tiêu chí, với mục đích tìm ra giải pháp tốt nhất dựa trên sự tương đồng với giải pháp tối ưu lý tưởng. Tuy nhiên, TOPSIS cũng có nhược điểm như không giải quyết được vấn đề thiếu tính toàn vẹn của thông tin trong bài toán [12]. Nếu các chỉ tiêu bị thiếu thông tin hoặc không chính xác, kết quả tối ưu có thể không chính xác. Ngoài ra, với các bài toán có quá nhiều tiêu chí, các kết quả tối ưu dễ bị ảnh hưởng bởi các chỉ tiêu phụ, và kết quả có thể không phù hợp với thực tế.

Để khắc phục các hạn chế này, bộ trọng số Entropy (Entropy Weight) thường được sử dụng [13]. Entropy Weight là một phương pháp định lượng để tính toán trọng số của các chỉ tiêu trong bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu [13, 14]. Phương pháp này dựa trên khái niệm về độ đa dạng (diversity) của các giá trị trong bảng dữ liệu. Bản chất của trọng số Entropy là sử dụng độ đa dạng để đánh giá tầm quan trọng của các chỉ tiêu và tính toán trọng số cho mỗi chỉ tiêu. Nếu các giá trị của một chỉ tiêu phân bố đều và có độ đa dạng cao, tức là không có giá trị nào chiếm ưu thế, thì chỉ tiêu đó sẽ có trọng số cao hơn. Ngược lại, nếu các giá trị của một chỉ tiêu tập trung quanh một giá trị, tức là có sự thiếu đa dạng, thì chỉ tiêu đó sẽ có trọng số thấp hơn.

Việc tính toán trọng số bằng trọng số Entropy sẽ giúp cân bằng tầm quan trọng của các chỉ tiêu và loại bỏ sự ảnh hưởng của các chỉ tiêu phụ, giúp tăng tính khách quan và chính xác của kết quả tối ưu. Từ đó, việc kết hợp trọng số Entropy sẽ giúp cải thiện độ chính xác và tính toàn vẹn của TOPSIS. Phương pháp này giúp tăng tính toàn vẹn và khả năng khách quan hóa của kết quả tối ưu, đồng thời giảm thiểu ảnh hưởng của các chỉ tiêu phụ, giúp cho kết quả tối ưu chính xác hơn và phù hợp hơn với thực tế.

Trong nghiên cứu này, phương pháp ra quyết định đa tiêu chí TOPSIS kết hợp với trọng số Entropy sẽ được sử dụng để lựa chọn ra bộ thông số công nghệ tối ưu từ các dữ liệu thực nghiệm.

Tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V bằng phương pháp TOPSIS kết hợp trọng số Entropy được thực hiện qua 7 bước [13]:

**Bước 1:** Xây dựng ma trận ra quyết định, với các phần tử của ma trận được xác định theo công thức (1).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & x_{1n} \\ x_{21} & \dots & x_{2j} & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó:

- $x_{ij}$  là giá trị của tiêu chí  $j$  trong phương án  $i$ ;
- $n$  là số tiêu chí
- $m$  là số lượng lựa chọn thay thế

**Bước 2:** Chuẩn hóa ma trận quyết định: Chuẩn hóa ma trận quyết định: Chuẩn hóa ma trận quyết định để các giá trị của các tiêu chí có thể so sánh được với nhau. Có nhiều phương pháp chuẩn hóa khác nhau, nhưng phương pháp Min-Max chuẩn hóa thường được sử dụng. Theo phương pháp này, giá trị của mỗi ô trong ma trận quyết định được chia cho phạm vi giá trị của tiêu chí tương ứng, do đó giá trị chuẩn hóa nằm trong khoảng từ 0 đến 1.

Ma trận chuẩn hóa  $R = (p_{ij})_{m \times n}$ , trong đó các giá trị  $x'_{ij}$  được tính toán theo công thức (2).

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, j \in [1, n] \quad (2)$$

**Bước 3:** Giá trị Entropy  $e_i$  của chỉ số thứ  $i$  được định nghĩa như sau:

$$e_i = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}), i = 1 \dots m; j = 1 \dots n \quad (3)$$

Trong đó, khoảng giá trị của giá trị Entropy  $e_i$  là  $[0, 1]$ . Với giá trị  $e_i$  càng lớn thì độ phân biệt của chỉ số  $i$  càng cao và có thể tìm thấy từ giá trị đó nhiều thông tin hơn. Do đó, trọng số cao hơn nên được gán cho chỉ số đó.

Từ đó, trọng số  $w_i$  với tiêu chí thứ  $i$  được tính theo công thức:

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (4)$$

Trọng số  $w_i$  sẽ được áp dụng tương ứng cho từng tiêu chí tối ưu hóa với phương pháp TOPSIS tại các bước tiếp theo.

**Bước 4:** Tính toán và xây dựng ma trận quyết định chuẩn hóa có trọng số, trong đó  $w_j$  là trọng số của tiêu chí  $j$ , được tính theo công thức (5).

$$Y = w_j \cdot p_{ij} \quad (5)$$

**Bước 5:** Xác định các giải pháp tốt nhất và xấu nhất bằng cách sử dụng các công thức:

$$A^+ = \{y_1^+, y_2^+, \dots, y_j^+, \dots, y_n^+\} \quad (6)$$

$$A^- = \{y_1^-, y_2^-, \dots, y_j^-, \dots, y_n^-\} \quad (7)$$

Trong đó:  $y_j^+$  và  $y_j^-$  tương ứng là phương án tốt nhất và kém nhất của tiêu chí thứ  $j$ .

**Bước 6:** Tính toán giá trị lý tưởng tích cực  $S_i^+$  và tiêu cực  $S_i^-$  theo công thức (8) và (9):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

**Bước 7:** Xác định các tiêu chí đánh giá và xếp hạng các giải pháp  $C_i^*$  theo công thức (10)

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m; 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad (10)$$

Các giá trị  $C_i^*$  được xếp hạng để lựa chọn phương án tốt nhất.

## 2.2. Phương pháp hàm giá trị mong muốn DFA

Phương pháp hàm mong muốn (DFA - Desirability Function Approach) là một phương pháp trong lĩnh vực tối ưu hóa đa mục tiêu, được sử dụng để đánh giá và tối ưu hóa đồng thời nhiều tiêu chí hoặc đặc điểm trong quá trình nghiên cứu hoặc thiết kế. Phương pháp này dựa trên việc xác định các hàm mong muốn (desirability functions) cho từng tiêu chí hoặc đặc điểm mà chúng ta muốn đạt được. Các hàm mong muốn thường được xây dựng dựa trên yêu cầu và mục tiêu cụ thể của vấn đề nghiên cứu.

Cụ thể, mỗi tiêu chí hoặc đặc điểm được gán một hàm mong muốn, thường là một hàm số tương đối, biểu thị mức độ mong muốn cao khi giá trị gần với mục tiêu và thấp khi giá trị xa khỏi mục tiêu. Hàm mong muốn này có thể được định nghĩa dựa trên các quan điểm và yêu cầu của người tham gia quyết định.

Sau đó, các hàm mong muốn được kết hợp lại thành một chỉ số tổng hợp, thường được gọi là Desirability Composite, để đo lường mức độ mong muốn toàn diện của một mẫu hoặc một bộ tham số. Desirability Composite giúp xác định mức độ tốt nhất hoặc tối ưu trên các tiêu chí đã xác định trước.

Phương pháp Desirability Function Approach là một công cụ hữu ích trong việc đưa ra quyết định dựa trên việc đạt được mức độ mong muốn cao nhất hoặc tối thiểu nhất trên các tiêu chí đánh giá, đồng thời giúp thấy rõ sự ảnh hưởng và quan hệ giữa các tiêu chí khác nhau.

Phương pháp tiếp cận hàm mong muốn được thực hiện qua các bước sau:

- Thực hiện thực nghiệm để thu thập dữ liệu thực nghiệm.
- Phát triển các mô hình dự đoán của các kết quả (ví dụ:  $R_a, U_c, MRR \dots$ ).
- Phân tích phương sai (ANOVA) cho các mô hình đã phát triển.
- Xác định các thông số cắt tối ưu bằng phương pháp tiếp cận mong muốn (Desirability Approach).

Theo phương pháp tiếp cận mong muốn, mỗi kết quả  $y_i$  được biến đổi thành một hàm mong muốn đơn lẻ  $d_i$ ,  $d_i \in [0, 1]$ . Nếu kết quả được kỳ vọng tối đa hóa,  $d_i$  sẽ được tính toán theo công thức (11):

$$d_i(y_i) = \begin{cases} 0, & y_i < L \\ \left(\frac{y_i - L}{H - L}\right)^r, & L \leq y_i \leq H \\ 1, & y_i > H \end{cases} \quad (11)$$

Trong trường hợp tối thiểu hóa kết quả, giá trị của  $d_i$  được xác định theo công thức (12):

$$d_i(y_i) = \begin{cases} 0, & y_i < L \\ \left(\frac{H - y_i}{H - L}\right)^r, & L \leq y_i \leq H \\ 1, & y_i > H \end{cases} \quad (12)$$

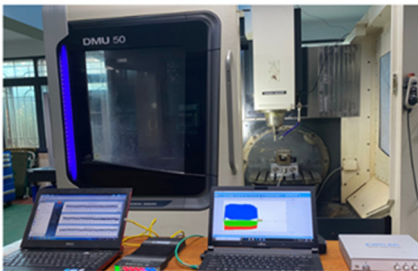
Trong đó,  $L$  và  $H$  lần lượt là giá trị giới hạn thấp và cao của  $y_i$ , và  $r$  là tham số được xác định bởi người sử dụng ( $r > 0$ ) để mô tả hình dạng của  $d_i$ . Cuối cùng, hàm mong muốn tổng hợp  $D$  được xác định bằng công thức (13):

$$D = \left( \prod_{i=1}^n D_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (13)$$

Trong công thức (13),  $w_i$  là trọng số, với  $w_i > 0$  và  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ ,  $n$  là số các tiêu chí đánh giá.

### 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

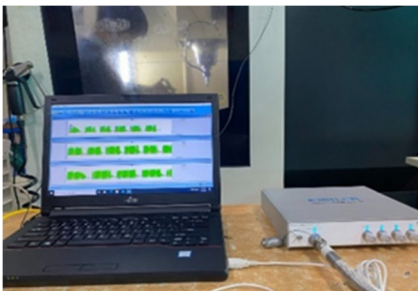
#### 3.1. Điều kiện thực nghiệm



a) Trung tâm gia công 5 trục DMG DMU50



b) Thiết bị đo nhám Mitutoyo Surftest JS-201



c) Thiết bị đo lực 3 chiều Kistler Dynamometer 9139AA

Hình 1. Thiết bị thực nghiệm

Thực nghiệm được triển khai trên trung tâm gia công 5 trục DMU 50 của hãng DMG Mori Seiki. Toàn bộ 27 phôi thực nghiệm được gia công tinh đạt kích thước 100x50x12,32mm. Trong mỗi thực nghiệm, phôi được gia công thô một lượt trước khi tiến hành gia công tinh.

#### 3.2. Triển khai thực nghiệm

Để xây dựng mô hình hồi quy cho mối liên hệ giữa độ nhám bề mặt  $R_a$ , năng lượng cắt riêng  $U_c$  và tỉ số bóc tách vật liệu MRR trong quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V, ma trận thực nghiệm Taguchi  $L_{27}$  được lựa chọn sử dụng nhằm giảm thiểu số lượng thực nghiệm nhưng vẫn đảm bảo được độ tin cậy trong phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số tới các tiêu chí đánh giá. Các thông số công nghệ quá trình gia công và thông số kỹ thuật hệ thống bôi trơn tối thiểu đã được phân tích và lựa chọn dựa trên các nghiên cứu đã công bố và ý kiến chuyên gia được tham khảo. Trong nghiên cứu thực nghiệm, giá trị tương ứng của các thông số công nghệ và thông số bôi trơn tối thiểu được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số công nghệ quá trình phay và vùng giá trị tương ứng

STT	Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Mức		
				1	2	3
1	Áp suất nguồn khí	P	bar	1	3	5
2	Lưu lượng dầu bôi trơn	Q	ml/h	50	100	150
3	Tốc độ cắt	$V_c$	m/ph	60	150	240
4	Lượng chạy dao răng	$f_z$	mm/răng	0,04	0,05	0,06
5	Chiều sâu cắt	$a_p$	mm	0,0,1	0,5	0,9

Giá trị độ nhám  $R_a$  của mỗi thực nghiệm được đo 3 lần trên máy đo nhám Mitutoyo Surftest JS-201. Giá trị về năng suất cắt gọt và năng lượng cắt riêng tương ứng với mỗi thực nghiệm được tính toán lần lượt theo công thức (14) và (15). Kết quả tổng hợp về  $R_a$ ,  $P_c$  và MRR được trình bày trong bảng 2.

$$MRR = \frac{a_e \cdot a_p \cdot V_f}{1000} \quad (14)$$

Trong đó:

- $a_e$  là bề rộng lát cắt (mm)
- $a_p$ : chiều sâu cắt (mm)
- $v_f$ : Tốc độ tiến dao, được xác định bởi:  $v_f = f_z \cdot n \cdot z$
- $z$ : Số răng của dao; trong nghiên cứu này,  $z = 2$  (răng)
- $f_z$ : Lượng chạy dao răng
- $n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d}$

Với:  $d$  là đường kính dụng cụ cắt;  $d = 17$ mm

$$U_c = \frac{P_c}{MRR} = \frac{\frac{60F_c}{V_c}}{MRR} = \frac{60F_c}{MRR \cdot V_c} \quad \left(\frac{J}{mm^3}\right) \quad (15)$$

Trong đó:

- $U_c$  là năng lượng cắt riêng ( $J/mm^3$ )

$P_c$ : Công suất cắt (W),  $P_c = F_c \cdot V_c / 60$  được xác định trên cơ sở lực cắt riêng  $F_c$

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

Với  $F_x$ ,  $F_y$  và  $F_z$  [N] là lực cắt lần lượt theo các phương x, y và z, được đo bởi thiết bị đo lực Kistler Dynamometer 9139AA. Kết quả đo và tính toán của các tiêu chí  $R_a$ ,  $U_c$ , MRR được tổng hợp trong bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả thực nghiệm

TT	P bar	Q ml/h	$V_c$ m/ph	$f_z$ mm/răng	$a_p$ mm	$R_a$ $\mu m$	MRR $mm^3/min$	$U_c$ $J/mm^3$
1	1	50	60	0,02	0,1	0,157	53,95	96,29
2	1	50	60	0,02	0,5	0,17	269,76	34,71
3	1	50	60	0,02	0,9	0,164	485,58	32,85
4	1	100	150	0,06	0,1	0,234	404,65	52,88
5	1	100	150	0,06	0,5	0,207	2023,23	19,62
6	1	100	150	0,06	0,9	0,239	3641,81	18,68
7	1	150	240	0,1	0,1	0,481	1079,06	25,86
8	1	150	240	0,1	0,5	0,545	5395,28	14,11
9	1	150	240	0,1	0,9	0,653	9711,50	15,54
10	3	50	150	0,1	0,1	0,35	674,41	26,43
11	3	50	150	0,1	0,5	0,416	3372,05	6,28
12	3	50	150	0,1	0,9	0,476	6069,69	5,23
13	3	100	240	0,02	0,1	0,184	215,81	166,40
14	3	100	240	0,02	0,5	0,197	1079,06	52,80
15	3	100	240	0,02	0,9	0,276	1942,30	48,42
16	3	150	60	0,06	0,1	0,212	161,86	46,93
17	3	150	60	0,06	0,5	0,22	809,29	18,03
18	3	150	60	0,06	0,9	0,204	1456,73	15,64
19	5	50	240	0,06	0,1	0,247	647,43	34,44
20	5	50	240	0,06	0,5	0,388	3237,17	7,48
21	5	50	240	0,06	0,9	0,763	5826,90	5,61
22	5	100	60	0,1	0,1	0,65	269,76	35,40
23	5	100	60	0,1	0,5	0,695	1348,82	11,89
24	5	100	60	0,1	0,9	0,663	2427,88	11,22
25	5	150	150	0,02	0,1	0,168	134,88	113,26
26	5	150	150	0,02	0,5	0,173	674,41	38,64
27	5	150	150	0,02	0,9	0,179	1213,94	32,98

4. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

4.1. Mô hình hồi quy

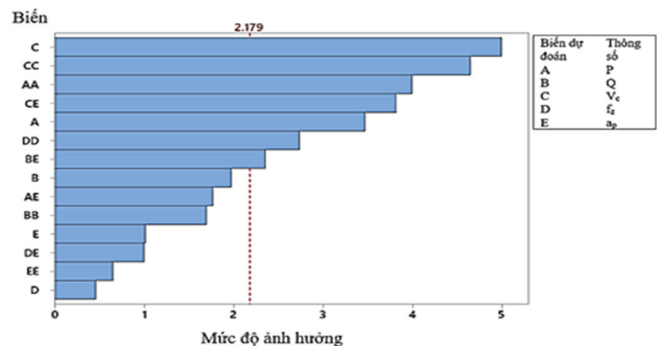
$$R_a = 0,383 - 0,1308P + 0,00388Q - 0,004603V_c - 0,87f_z - 0,210a_p + 0,02369P^2 - 0,000016Q^2 + 0,000014V_c^2 + 40,6f_z^2 + 0,097a_p^2 + 0,0371a_pP - 0,001975Qa_p + 0,001778V_c a_p + 1,05f_z a_p$$

$$U_c = 100,2 + 15,01P + 01,272Q - 0,008V_c - 2555f_z - 227,7a_p - 2,37P^2 - 0,00587Q^2 + 0,000313V_c^2 + 11447f_z^2 + 130,9a_p^2 + 2,64a_pP - 0,035Qa_p - 0,088V_c a_p + 1073f_z a_p$$

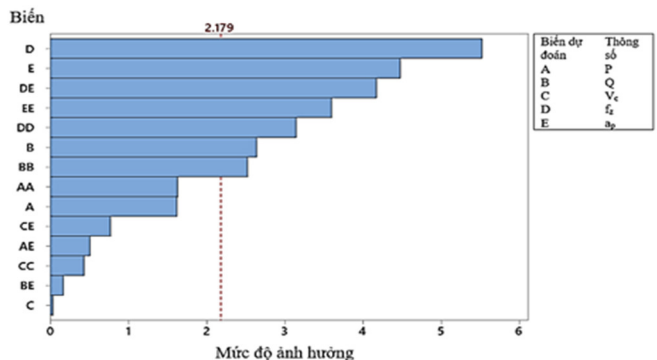
Bảng 3. Kết quả phân tích ANOVA cho mô hình hồi quy của  $R_a$  và  $U_c$

Thông số	$R_a$				$U_c$			
	SSs	MS	F-value	p-value	SSs	MS	F-value	p-value
P	0,973	0,070	20,6	0	32194	2300	11,32	0
Q	0,041	0,041	12,03	0,005	535	535	2,63	0,131
$V_c$	0,013	0,013	3,9	0,072	1418	1418	6,98	0,021
$f_z$	0,084	0,084	24,95	0	0	0	0	0,973
$a_p$	0,001	0,001	0,21	0,655	6196	6196	30,51	0
$P^*P$	0,003	0,003	1,03	0,331	4074	4074	20,06	0,001
$Q^*Q$	0,054	0,054	15,97	0,002	541	541	2,66	0,129
$V_c^*V_c$	0,010	0,010	2,88	0,116	1294	1294	6,37	0,027
$f_z^*f_z$	0,073	0,073	21,61	0,001	39	39	0,19	0,671
$a_p^*a_p$	0,025	0,025	7,5	0,018	2013	2013	9,91	0,008
$P^*a_p$	0,001	0,001	0,42	0,527	2631	2631	12,96	0,004
$Q^*a_p$	0,011	0,011	3,13	0,102	54	54	0,26	0,617
$V_c^*a_p$	0,019	0,019	5,55	0,036	6	6	0,03	0,867
$f_z^*a_p$	0,049	0,049	14,56	0,002	122	122	0,6	0,454

Với hệ số  $R^2$  và  $R^2$  hiệu chỉnh của mô hình hồi quy cho độ nhám bề mặt  $R_a$  là 96,00% và 91,34% và trong khi đó, các hệ số này cho mô hình hồi quy của năng lượng cắt riêng lần lượt 92,96%; 84,75%, thấp hơn khoảng 4% so với  $R_a$ , chứng tỏ độ tin cậy về dự báo độ nhám cao hơn dự báo về năng lượng cắt riêng. Tuy nhiên, các hệ số này đều khá cao, có thể sử dụng trong việc dự báo và các phân tích tối ưu hóa sẽ được trình bày trong nội dung tiếp theo của nghiên cứu.



a) Độ nhám bề mặt  $R_a$



b) Năng lượng cắt riêng  $U_c$

Hình 2. Biểu đồ Pareto về mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ nhám bề mặt  $R_a$  và năng lượng cắt riêng  $U_c$ .

Bảng 4. Kết quả phân tích tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng phương pháp TOPSIS

P	Q	V <sub>c</sub>	f <sub>z</sub>	a <sub>p</sub>	R <sub>a</sub>	U <sub>c</sub>	MRR	Si+	Si-	P	Ranking
bar	ml/h	m/ph	mm/răng	mm	μm	J/mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup> /min				
1	50	60	0,02	0,1	0,157	96,29	53,50	0,292	0,124	0,298	25
1	50	60	0,02	0,5	0,17	34,71	269,76	0,269	0,179	0,400	17
1	50	60	0,02	0,9	0,164	32,85	485,58	0,262	0,181	0,408	15
1	100	150	0,06	0,1	0,234	52,88	404,65	0,270	0,145	0,350	24
1	100	150	0,06	0,5	0,207	19,62	2023,23	0,220	0,189	0,462	9
1	100	150	0,06	0,9	0,239	18,68	3641,81	0,175	0,208	0,543	5
1	150	240	0,10	0,1	0,481	25,86	1079,06	0,262	0,165	0,386	19
1	150	240	0,10	0,5	0,545	14,11	5395,28	0,154	0,232	0,601	4
<b>1</b>	<b>150</b>	<b>240</b>	<b>0,10</b>	<b>0,9</b>	<b>0,653</b>	<b>15,54</b>	<b>9711,50</b>	<b>0,094</b>	<b>0,324</b>	<b>0,774</b>	<b>1</b>
3	50	150	0,10	0,1	0,35	26,43	674,41	0,262	0,167	0,389	18
3	50	150	0,10	0,5	0,416	6,28	3372,05	0,188	0,211	0,529	6
3	50	150	0,10	0,9	0,476	5,23	6069,69	0,117	0,255	0,685	2
3	100	240	0,02	0,1	0,184	166,40	215,81	0,327	0,079	0,195	27
3	100	240	0,02	0,5	0,197	52,80	1079,06	0,250	0,156	0,384	21
3	100	240	0,02	0,9	0,276	48,42	1942,30	0,225	0,166	0,425	14
3	150	60	0,06	0,1	0,212	46,93	161,86	0,274	0,162	0,371	23
3	150	60	0,06	0,5	0,22	18,03	809,29	0,252	0,192	0,433	12
3	150	60	0,06	0,9	0,204	15,64	1456,73	0,233	0,197	0,458	10
5	50	240	0,06	0,1	0,247	34,44	647,43	0,264	0,158	0,375	22
5	50	240	0,06	0,5	0,388	7,48	3237,17	0,191	0,208	0,522	7
5	50	240	0,06	0,9	0,763	5,61	5826,90	0,122	0,250	0,672	3
5	100	60	0,10	0,1	0,65	35,40	269,76	0,269	0,169	0,385	20
5	100	60	0,10	0,5	0,695	11,89	1348,82	0,237	0,197	0,454	11
5	100	60	0,10	0,9	0,663	11,22	2427,88	0,207	0,205	0,498	8
5	150	150	0,02	0,1	0,168	113,26	134,88	0,298	0,106	0,262	26
5	150	150	0,02	0,5	0,173	38,64	674,41	0,258	0,172	0,400	16
5	150	150	0,02	0,9	0,179	32,98	1213,94	0,242	0,180	0,426	13

Biểu đồ phân tích Pareto cho thấy vận tốc cắt V<sub>c</sub> có mức độ ảnh hưởng cao nhất tới giá trị độ nhám bề mặt, tiếp theo là ảnh hưởng của áp suất dòng khí làm mát P và lưu lượng dầu bôi trơn Q. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và lượng chạy dao răng f<sub>z</sub> tới độ nhám bề mặt là không đáng kể.

Tương tự, lượng chạy dao răng f<sub>z</sub> có ảnh hưởng lớn nhất tới năng lượng cắt riêng U<sub>c</sub>, tiếp theo là ảnh hưởng của chiều sâu cắt a<sub>p</sub> và lưu lượng dầu bôi trơn Q. Ảnh hưởng của vận tốc cắt là không đáng kể.

**4.2. Tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng kết hợp TOPSIS - Entropy**

Phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng TOPSIS kết hợp với trọng số Entropy được tính toán theo các công

thức (1) đến (10), kết quả tính toán được tổng hợp trong bảng 4.

**4.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng phương pháp hàm mong muốn DFA**

Áp dụng phương pháp tiếp cận hàm mong muốn DFA với mục tiêu là tối đa hóa MRR, tối thiểu hóa R<sub>a</sub> và U<sub>c</sub>, sử dụng phần mềm MiniTab, với các điều kiện biên như (18), kết quả 27 giá trị xếp hạng tối ưu hóa tương ứng với 27 giá trị mong muốn cao nhất được trình bày trong bảng 5.

$$\begin{cases} 1 \leq P \leq 5 \\ 50 \leq Q \leq 150 \\ 60 \leq V_c \leq 240 \\ 0,02 \leq f_z \leq 0,10 \\ 0,1 \leq a_p \leq 0,9 \end{cases} \quad (18)$$

Bảng 5. Kết quả phân tích tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng phương pháp TOPSIS-Entropy

STT	P	Q	V <sub>c</sub>	f <sub>z</sub>	a <sub>p</sub>	R <sub>a</sub>	U <sub>c</sub>	MRR	Giá trị mong muốn
	bar	ml/h	m/ph	mm/răng	mm	µm	J/mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup> /ph	
1	1,00	150,0	189,09	0,06	0,90	0,244	6065,02	5,204	0,81
2	3,53	150,0	191,54	0,06	0,90	0,257	4617,15	10,553	0,72
3	1,00	150,0	240,00	0,08	0,90	0,492	8377,95	9,029	0,72
4	1,00	50,0	240,00	0,04	0,90	0,397	5860,33	10,156	0,70
5	3,03	50,0	184,72	0,06	0,90	0,312	4432,45	5,842	0,69
6	1,00	150,0	60,00	0,08	0,90	0,308	4052,08	8,358	0,67
7	1,00	50,0	240,00	0,03	0,62	0,272	3707,45	25,134	0,64
8	1,00	50,0	60,01	0,09	0,90	0,488	4633,13	5,826	0,60
9	1,36	50,0	60,03	0,10	0,90	0,531	4811,30	12,823	0,56
10	1,00	150,0	72,22	0,05	0,73	0,116	1731,63	8,696	0,55
11	1,00	50,0	240,00	0,09	0,90	0,671	8953,43	6,123	0,52
12	1,00	50,0	77,39	0,03	0,82	0,157	1369,75	11,153	0,51
13	5,00	50,0	240,00	0,02	0,67	0,414	2444,90	30,049	0,49
14	5,00	150,0	60,00	0,09	0,90	0,554	3144,98	5,865	0,48
15	3,00	100,0	132,30	0,05	0,68	0,157	1178,97	24,055	0,47
16	1,00	150,0	156,58	0,05	0,18	0,157	1250,40	43,571	0,45
17	1,00	50,0	205,99	0,06	0,14	0,157	1245,65	43,738	0,45
18	1,00	150,0	189,52	0,05	0,15	0,157	1187,45	56,809	0,43
19	5,00	50,0	186,16	0,05	0,15	0,205	1005,60	41,573	0,41
20	5,00	150,0	177,39	0,05	0,16	0,228	982,03	50,692	0,39
21	5,00	50,0	177,95	0,03	0,22	0,157	891,28	59,121	0,38
22	4,71	50,0	142,43	0,06	0,10	0,186	627,46	41,216	0,35
23	1,00	50,0	61,19	0,07	0,10	0,308	696,31	28,768	0,35
24	5,00	150,0	185,53	0,10	0,10	0,487	1107,00	28,665	0,35
25	5,00	150,0	192,82	0,03	0,16	0,188	837,65	78,451	0,35
26	1,00	150,0	76,79	0,04	0,17	0,215	702,32	54,872	0,35
27	1,00	50,0	60,00	0,05	0,12	0,253	624,19	42,280	0,34

Kết quả tối ưu hóa được tính toán bởi phương pháp TOPSIS-Entropy (bảng 4) và được tính toán bởi phương pháp tiếp cận hàm mong muốn DFA (bảng 5) được tổng hợp trong bảng 6. Kết quả tính toán tối ưu hóa từ hai phương pháp cho thấy sự khác biệt.

Bảng 6. So sánh kết quả phân tích tối ưu hóa được tính toán bởi TOPSIS-Entropy và DFA

Phương pháp tối ưu	Thông số công nghệ và thông số bôi trơn tối thiểu					Tiêu chí tối ưu hóa		
	P	Q	V <sub>c</sub>	f <sub>z</sub>	a <sub>p</sub>	R <sub>a</sub>	U <sub>c</sub>	MRR
	bar	ml/g	m/ph	mm/răng	mm	µm	J/mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup> /ph
TOPSIS-Entropy	1,00	150,0	240	0,10	0,9	0,653	9711,5	15,54
DFA	1,00	150,0	189,09	0,06	0,9	0,244	6065,02	5,204
Kết quả so sánh DFA và TOPSIS-Entropy						↓37%	↓33%	↓62%

- Kết quả tối ưu hóa được tính toán bởi DFA có cùng giá trị về áp suất khí P, lưu lượng dầu bôi trơn Q và chiều sâu cắt a<sub>p</sub>, tuy nhiên DFA đề xuất giá trị cho lượng chạy dao răng là 0,06 mm/răng so với 0,1 mm/răng được tính toán bởi TOPSIS-Entropy. Việc giảm chiều sâu cắt sẽ làm giảm 62% tỉ lệ cắt gọt vật liệu MRR, tức là giảm năng suất cắt. Tuy nhiên, việc giảm chiều sâu cắt được dự đoán là sẽ cải thiện chất lượng bề mặt với lượng giảm 37% (giảm từ 0,653µm còn 0,244µm), đồng thời giảm 33% năng lượng cắt riêng, mức giảm từ 9711,5W còn 6065,02W.

- Phương pháp TOPSIS-Entropy xếp hạng 27 phương án đã thực nghiệm để tìm ra bộ thông số công nghệ được cho là tối ưu nhất, trong khi đó phương pháp DFA tính toán và đưa ra bộ 27 giá trị tối ưu nhất và xếp hạng những phương án này theo giá trị mong muốn tương ứng trên cơ sở các hàm hồi quy toán học của R<sub>a</sub>, U<sub>c</sub> và công thức tính MRR theo các thông số công nghệ của nghiên cứu. Do vậy, 27 giá trị này không trùng hợp với các giá trị đã thực nghiệm.

### 5. KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả trên nghiên cứu này, có thể rút ra các kết luận sau như sau:

- Hai phương pháp TOPSIS-Entropy và DFA đều có khả năng tối ưu hóa quá trình phay hợp kim Ti-6Al-4V. Tuy nhiên, DFA cho phép tinh chỉnh giá trị mong muốn theo các tiêu chí cụ thể, trong khi TOPSIS-Entropy dựa trên việc xếp hạng các phương án.

- Phương pháp DFA có thể giúp đưa ra các giá trị tối ưu cho các thông số công nghệ dựa trên giá trị mong muốn của các đặc điểm chất lượng như R<sub>a</sub>, U<sub>c</sub> và MRR. Điều này giúp tối ưu hóa đồng thời cả hiệu suất và chất lượng sản phẩm.

- Phương pháp TOPSIS-Entropy có khả năng xếp hạng các phương án thực nghiệm để tìm ra bộ thông số công nghệ tối ưu. Nó đưa ra sự đánh giá toàn diện dựa trên một số tiêu chí được xác định trước, giúp người sử dụng có cái nhìn tổng quan về các phương án và lựa chọn tối ưu nhất.

- Kết quả tối ưu được tính toán bởi hai phương pháp cho cùng giá trị về áp suất khí P, lưu lượng dầu bôi trơn Q và chiều sâu cắt a<sub>p</sub>, tuy nhiên DFA đề xuất giá trị lượng chạy dao răng f<sub>z</sub> là 0,06mm/răng, trong khi giá trị tính toán bởi TOPSIS-Entropy là 0,1mm/răng. Việc giảm chiều sâu cắt có thể cải thiện chất lượng bề mặt nhưng đồng thời giảm năng suất cắt. Sự lựa chọn giữa hai phương pháp phụ thuộc vào mục tiêu và tiêu chí của nghiên cứu, đồng thời cân nhắc giữa chất lượng và hiệu suất của quá trình.

- Phương pháp nghiên cứu này có thể được áp dụng cho các quá trình gia công khác như tiện, mài, cắt dây... hoặc sử dụng kết hợp với các phương pháp, các thuật toán tối ưu khác để phát huy điểm mạnh và khắc phục điểm yếu của mỗi phương pháp trong từng trường hợp cụ thể.

### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được thực hiện với sự hỗ trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo qua đề tài mã số B2021-BKA-11. Nhóm

nghiên cứu trân trọng cảm ơn Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã tạo điều kiện về thiết bị gia công và đo lường trong thời gian thực hiện đề tài.

---

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyen Thanh Cong, Nguyen Chi Bao, Nguyen Nhu Tung, Pham Thi Thieu Thoa, Nguyen Van Canh, Hoang Tien Dzung, 2021. *Predicting the effects of cutting parameters and flow rates, pressures of minimum quantity lubrication (MQL) on cutting force and surface roughness in milling of hardened steel S50C on 5-axis CNC machining center*. Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry, vol. 57, no. 5, pp. 63–70.
- [2]. J. K. Alireza Alinezhad, 2019. *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. Springer International Publishing.
- [3]. Hoang Tien Dzung, Van Canh Nguyen, Thuy Duong Nguyen, 2021. *Cutting Parameter Optimization in Finishing Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy under MQL Condition using TOPSIS and ANOVA Analysis*. Eng. Technol. & Appl. Sci. Res., vol. 11, no. 1, pp. 6775–6780, doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.4015>.
- [4]. S. Subbiah, 2015. *Science of machining*. doi: 10.1007/978-1-4471-4670-4\_1.
- [5]. I. K. Suniantara, E. Wiantara, 2019. *Comparison of VIKOR and TOPSIS Methods in Multiresponse Taguchi Optimization*. J. Educ. Res. Eval., vol. 2, p. 106, doi: 10.23887/jere.v2i3.12796.
- [6]. R. Nadda, R. Kumar, T. Singh, R. Chauhan, A. Patnaik, B. Gangil, 2018. *Experimental investigation and optimization of cobalt bonded tungsten carbide composite by hybrid AHP-TOPSIS approach*. Alexandria Eng. J., vol. 57, no. 4, pp. 3419–3428, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.013>.
- [7]. A. Malik, A. Manna, 2018. *Multi-response optimization of laser-assisted jet electrochemical machining parameters based on gray relational analysis*. J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng., vol. 40, no. 3, p. 148, doi: 10.1007/s40430-018-1069-9.
- [8]. C. Hwang, Yoon, 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Application*. Springer-Verlag.
- [9]. V. C. Nguyen, V. T. Le, N. L. Pham, A. T. Nguyen, 2023. *Multi-Objective Optimization for Weld Track Geometry in Wire-Arc Directed Energy Deposition of ER308L Stainless Steel*. J. Mach. Eng., vol. 23, no. June, pp. 5–17, doi: <https://doi.org/10.36897/jme/166134>.
- [10]. V. Pham, T. Nguyen, V. T. Le, D. Tien, V. C. Nguyen, 2022. *Optimization of Cutting Parameters in MQL Flat Surface Milling of SKD11 Steel*. Proceedings of the International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation, and Sustainable Development 2021 (AMAS2021) pp 261–266. doi: 10.1007/978-3-030-99666-6\_40.

[11]. J.J. H. Gwo-Hshiung Tzeng, 2011. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC.

[12]. P. Wang, Z. Zhu, Y. Wang, 2016. *A novel hybrid MCDM model combining the SAW, TOPSIS and GRA methods based on experimental design*. Inf. Sci. (Ny), vol. 345, pp. 27–45, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.01.076>.

[13]. J. Huang, 2008. *Combining Entropy Weight and TOPSIS Method for Information System Selection*. in CIS 2008, IEEE, 2008, pp. 1281–1284. doi: 10.1109/ICCIS.2008.4670971.

[14]. W. Salabun, J. Watróbski, A. Shekhovtsov, 2020. *Are MCDA methods benchmarkable? A comparative study of TOPSIS, VIKOR, COPRAS, and PROMETHEE II methods*. Symmetry (Basel), vol. 12, no. 9, pp. 1–55, doi: 10.3390/SYM12091549.

---

#### AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Van Canh<sup>1</sup>, Nguyen Thuy Duong<sup>2</sup>, Pham Le Viet Anh<sup>3</sup>,  
Hoang Tien Dzung<sup>1</sup>, Pham Van Hung<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

<sup>3</sup>FPT Software Company Limited, Vietnam