

BỘ CÔNG THƯƠNG BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

NARIME

MAI TẮT LỢI

NGHIÊN CỨU GIA CÔNG BỀ MẶT TRỤ NGOÀI
KHI XUNG TIA LỬA ĐIỆN CỖ TRỢ GIÚP
CỦA RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM
SỬ DỤNG ĐIỆN CỰC GRAPHITE

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Ngành: Kỹ thuật Cơ khí

Mã số: 9520103

HÀ NỘI - 2026

Công trình được hoàn thành tại:

Viện Nghiên cứu Cơ khí - Bộ Công Thương

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. Người hướng dẫn 1: GS.TS Vũ Ngọc Pi**
- 2. Người hướng dẫn 2: PGS.TS. Lê Thu Quý**

Phản biện 1: PGS.TS. Nguyễn Hữu Phần

Phản biện 2: PGS.TS. Bùi Ngọc Tuyên

Phản biện 3: PGS.TS. Hoàng Văn Gọt

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Viện

Hop tại: Viện Nghiên cứu Cơ khí - Bộ Công Thương

Tòa nhà trụ sở chính: số 4 đường Phạm Văn Đồng, phường Phú Diễn, TP Hà Nội

Vào hồi giờ, ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Quốc gia Việt Nam
2. Thư viện Viện Nghiên cứu Cơ khí

PHẦN MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Gia công xung điện (*EDM*) là phương pháp gia công không truyền thống được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng gia công hiệu quả các vật liệu cứng sau nhiệt luyện và các chi tiết có hình dạng phức tạp với lực cắt nhỏ. Tuy nhiên, quá trình *EDM* vẫn tồn tại những hạn chế cơ bản như năng suất bóc tách vật liệu thấp, mòn điện cực lớn và chất lượng bề mặt gia công chưa cao. Các công trình tập trung phân tích ảnh hưởng của thông số đầu vào đến *MRR*, *EWR* và *Ra* khi gia công nhiều loại vật liệu khác nhau. Đồng thời, tác động của chế độ xung và vật liệu điện cực đến chất lượng bề mặt và độ mòn cũng đã được làm rõ, tạo nền tảng quan trọng cho việc tối ưu hóa quá trình *EDM*.

Nhằm khắc phục các hạn chế và nâng cao hiệu quả của quá trình *EDM*, nhiều giải pháp đã được đề xuất như tối ưu chế độ xung, điều khiển thích nghi chuyển động điện cực, sử dụng dung dịch điện môi trộn bột và trợ giúp rung động. Trong đó, *EDM* có trợ giúp rung động cho thấy hiệu quả rõ rệt nhờ cải thiện khả năng thoát mảnh vụn và lưu thông điện môi trong khe hở phóng điện, từ đó làm tăng tần số phóng điện và năng suất bóc tách vật liệu. Các nghiên cứu về *EDM* bề mặt trụ ngoài có trợ giúp rung động siêu âm, đặc biệt khi sử dụng điện cực graphite, vẫn còn hạn chế. Vì vậy “*Nghiên cứu gia công bề mặt trụ ngoài bằng gia công xung điện có trợ giúp của rung động với điện cực graphite*” là nghiên cứu có tính cấp thiết.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Đánh giá mức độ cải thiện khả năng gia công xung điện bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi với chất lượng cao và năng suất tốt nhất, sử dụng phương pháp gia công xung điện có sự trợ giúp của rung động siêu âm với điện cực Graphite HK2.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Quá trình *EDM* có rung động khi gia công bề mặt trụ ngoài bằng điện cực graphite.

Phạm vi nghiên cứu được giới hạn trên vật liệu 90CrSi, đường kính $\varnothing 14 \pm 0,01 \text{mm}$; Điện cực graphite HK2 có đường kính $\varnothing 12 \pm 0,01 \text{mm}$.

Máy *EDM*: Máy xung CNC hãng Sodick, Nhật Bản; Model: MarkA30

4. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực nghiệm

5. Nội dung nghiên cứu

Nghiên cứu tổng quan, nghiên cứu cơ sở lý thuyết, nghiên cứu lựa chọn đầu rung, Thực nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của I_p , T_{on} , T_{off} , SV , A đến *MRR*, *Ra*, *HWR* khi xung tia lửa điện bề mặt trụ ngoài vật liệu 90CrSi sử dụng điện cực graphite.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

* Ý nghĩa khoa học:

Nghiên cứu làm rõ ảnh hưởng của rung động đến quá trình xung và xác định được các thông số rung và thông số đầu vào tối ưu nâng cao hiệu quả quá trình *EDM*.

Đề tài đóng góp một số kết quả vào hướng nghiên cứu về *EDM* có sự trợ giúp của rung động.

Kết quả của đề tài có thể dùng làm cơ sở để tham khảo cho các nghiên cứu

khoa học trong lĩnh vực gia công cơ khí.

*** Ý nghĩa thực tiễn:**

• Ứng dụng rung động siêu âm vào quá trình xung bề mặt trụ ngoài để nâng cao hiệu quả quá trình xung trong thực tiễn gia công chày dập viên nén định hình.

• Kết quả nghiên cứu có thể làm tài liệu tham khảo phục vụ cho công tác giảng dạy, nghiên cứu trong lĩnh vực gia công cơ khí.

Tính mới và tiên phong của đề tài thể hiện ở việc:

• Một trong những nghiên cứu tiên phong về gia công xung điện tích hợp rung động siêu âm (*UV-EDM*) để gia công bề mặt trụ ngoài - dạng biên dạng đặc trưng, khó gia công bằng phương pháp *EDM* truyền thống do hiện tượng tích tụ mảnh vụn và mất ổn định hồ quang.

• Sử dụng điện cực graphite, loại vật liệu có độ dẫn điện tốt và khả năng tạo hình cao nhưng dễ bị mòn, do đó rất phù hợp để đánh giá hiệu quả giảm *EWR* của rung siêu âm.

• Hướng tới tối ưu hóa đơn mục tiêu và đa mục tiêu bao gồm năng suất bóc tách vật liệu, độ nhám bề mặt và tốc độ mòn của điện cực, phù hợp với yêu cầu của sản xuất hiện đại.

Cấu trúc của luận án: 4 chương

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP GIA CÔNG XUNG ĐIỆN CÓ SỰ TRỢ GIÚP CỦA RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM

1.1 Tổng quan về gia công bằng tia lửa điện (*EDM*)

1.1.1. Lịch sử phát triển

Gia công bằng tia lửa điện (*EDM*) hình thành từ những phát hiện ban đầu vào thế kỷ XVIII và được phát triển thành phương pháp gia công có kiểm soát từ giữa thế kỷ XX. Sự tiến bộ của công nghệ phát xung, cắt dây và điều khiển số đã không ngừng nâng cao độ ổn định, độ chính xác và phạm vi ứng dụng của *EDM*. Hiện nay, các hướng phát triển *EDM* lai, đặc biệt là kết hợp rung động siêu âm, được xem là giải pháp tiềm năng nhằm nâng cao hiệu suất gia công vật liệu khó và siêu cứng.

1.1.2 Nguyên lý gia công *EDM*

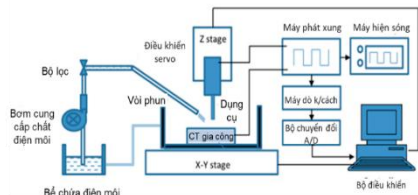
Quá trình phóng điện *EDM* được diễn ra tuần hoàn theo chu kỳ xung, bao gồm:

- Thời gian phát xung (T_{on}): Thời gian tia lửa hình thành và bóc tách vật liệu.
- Thời gian ngắt xung (T_{off}): Thời gian nghỉ phục hồi điện môi và xả mảnh vụn.
- Máy phát xung điều khiển dòng điện dạng xung đi đến điện cực.
- Bộ điều khiển servo
- Bể chứa, bơm và bộ lọc điện môi.
- Máy hiện sóng, cảm biến khoảng cách và bộ chuyển đổi A/D.

cách và bộ chuyển đổi A/D.

1.1.3 Các thông số công nghệ cơ bản của quá trình xung điện

- Điện áp phóng điện (SV).
- Dòng điện xung (I_p).
- Thời gian phát xung (T_{on})
- Thời gian ngừng phát xung (T_{off}).



Hình 1. 1. Sơ đồ gia công xung điện

1.1.4. Các chỉ tiêu đánh giá quá trình xung điện

Tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*); Tỷ lệ mòn điện cực (*EWR*); Chất lượng bề mặt gia công; Độ chính xác gia công.

1.2. Tổng quan về gia công xung điện có trợ giúp của rung siêu âm

1.2.1. Sự cần thiết của rung động siêu âm trong gia công EDM

Việc tích hợp rung động siêu âm vào quá trình EDM giúp cải thiện đáng kể khả năng thoát mảnh vụn và ổn định phóng điện, từ đó nâng cao năng suất, giảm mòn điện cực và cải thiện chất lượng bề mặt gia công. Nhờ những ưu thế này, EDM có trợ giúp rung động siêu âm cho thấy hiệu quả vượt trội khi gia công các vật liệu khó gia công và mở rộng tiềm năng ứng dụng trong sản xuất hiện đại.

1.2.2. Nguyên lý của EDM hỗ trợ rung siêu âm

Rung động siêu âm hỗ trợ EDM thông qua ba cơ chế chính: (1) Khuấy động môi trường điện môi bằng hiệu ứng xâm thực và dòng chảy dao động, giúp loại bỏ mảnh vụn và khí nhanh chóng; (2) Điều biến khe hở phóng điện một cách tuần hoàn, cải thiện tuần hoàn chất điện môi và phân bố năng lượng phóng điện đồng đều; (3) Tác động cơ nhiệt kết hợp làm giảm tập trung nhiệt và ứng suất cục bộ trên bề mặt.

1.2.3 Các hình thức rung động siêu âm sử dụng trong gia công EDM

Phân loại theo hướng và dạng dao động: Rung dọc trục (*ID*); Rung xoắn (*ID* xoắn); Rung kết hợp dọc-xoắn (*LTV*); Rung quỹ đạo tròn 2D (*UCV*); Rung ngang (phương ngang của phôi). Phân loại theo bộ phận: Rung điện cực; Rung phôi; Rung môi trường điện môi. Phân loại theo quá trình gia công kết hợp: *Micro-EDM*; EDM có trộn bột; EDM trong khí/điện môi hạn chế; EDM kết hợp các trường vật lý khác.

1.3 Tình hình nghiên cứu về UV-EDM trên thế giới

Việc ứng dụng rung động siêu âm trong gia công đã được nghiên cứu từ sớm và từng bước được tích hợp vào quá trình EDM từ giữa thế kỷ XX. Qua các giai đoạn phát triển, đặc biệt từ những năm 2000 trở lại đây, các nghiên cứu UV-EDM tập trung định lượng hiệu quả của rung động siêu âm và đều cho thấy ưu thế rõ rệt so với EDM truyền thống. Gần đây, nhiều cấu hình và giải pháp UV-EDM tiên tiến đã được đề xuất nhằm giải quyết các bài toán gia công khó, góp phần mở rộng khả năng ứng dụng của công nghệ này.

Cơ chế quá trình và mô phỏng

Trong UV-EDM, rung động siêu âm làm xuất hiện các xoáy cục bộ và gây biến thiên mạnh của trường vận tốc-áp suất trong khe phóng điện. Hệ quả là dòng chảy điện môi chuyển từ trạng thái tầng sang trạng thái rối hơn, góp phần thay đổi đáng kể điều kiện thủy động học so với EDM truyền thống.

1.4 Tình hình nghiên cứu trong nước

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về EDM chủ yếu tập trung vào tối ưu hóa quá trình EDM và PMEDM nhằm nâng cao năng suất và chất lượng bề mặt. Một số công trình bước đầu đã xem xét vai trò của rung động cơ học, tiêu biểu là nghiên cứu của Lê Quang Dũng và cộng sự, cho thấy rung động tần số thấp có tác dụng rõ rệt trong việc tăng *MRR*, giảm độ nhám và mòn điện cực khi PMEDM. Gần đây, nghiên cứu của V.T. Đình đánh dấu bước tiến mới khi tiếp cận EDM có trợ giúp rung động siêu âm thông qua thiết kế và thử nghiệm *horn* siêu âm cho gia công bề mặt trụ ngoài,

mở ra hướng nghiên cứu tiềm năng cho *UV-EDM* tại Việt Nam.

1.5 Tổng quan xu hướng

Các nghiên cứu về *EDM* có trợ giúp rung động siêu âm đã khẳng định hiệu quả vượt trội và mở rộng phạm vi ứng dụng của công nghệ này. Tuy nhiên, ứng dụng *UV-EDM* cho gia công bề mặt trụ ngoài thép hợp kim dụng cụ 90CrSi bằng điện cực graphite vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Vì vậy, luận án tập trung giải quyết khoảng trống này, góp phần bổ sung cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc mở rộng ứng dụng *UV-EDM*.

Kết luận Chương 1:

- *UV-EDM* đã được chứng minh là nâng cao hiệu suất, chất lượng bề mặt và độ ổn định khi gia công vật liệu khó.
- Ứng dụng *UV-EDM* trong gia công bề mặt trụ ngoài với điện cực graphite còn hạn chế, cần nghiên cứu thực nghiệm bổ sung.
- Rung siêu âm cải thiện cơ chế bóc vật liệu và hình thành bề mặt thông qua phân tán năng lượng phóng điện và tăng cường xâm thực.
- Các phân tích này là cơ sở để lựa chọn thông số và xây dựng phương án thí nghiệm ở chương tiếp theo.

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM

2.1 Phương pháp thiết kế thí nghiệm Box-Behnken

Phương pháp thiết kế Box–Behnken (*BBD*) thuộc Bề mặt đáp ứng (*RSM*) được sử dụng để xây dựng ma trận thí nghiệm nhằm mô hình hóa và tối ưu hóa đồng thời ba hàm mục tiêu: *Ra*, *MRR* và *HWR*. Năm thông số đầu vào được khảo sát trong nghiên cứu gồm: *A* (μm): Biên độ rung siêu âm; *T_{on}* (μs): Thời gian phóng điện; *T_{off}* (μs): Thời gian ngắt; *I_p* (A): Dòng điện xung; *SV* (V): Điện áp xung.

Mô hình hồi quy được xây dựng dưới dạng hàm bậc hai như sau:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

2.2 Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng quy trình tối ưu hóa đa mục tiêu gồm thiết kế thí nghiệm, xử lý dữ liệu bằng biến đổi Box–Cox, mô hình hóa bằng Gaussian Process Regression và giải bài toán tối ưu bằng thuật toán *NSGA-II*, kết hợp phương pháp *AHP* để lựa chọn phương án tối ưu.

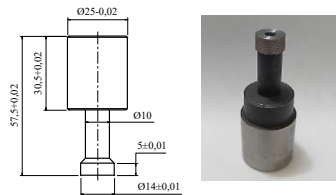
2.3 Thiết kế hệ thống thí nghiệm

2.3.1 Vật liệu gia công 90CrSi

Chi tiết gia công là thép 90CrSi được lựa chọn dựa vào kích thước chày đập thuốc định hình dạng viên nén. Có hình dạng và kích thước như trong Hình 2.1.

2.3.2 Vật liệu điện cực graphite HK2

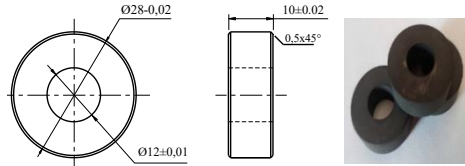
Điện cực graphite HK2 Có hình dạng và kích thước như trong Hình 2.3.



Hình 2.1 Chi tiết gia công 90CrSi

2.4 Thiết kế *Horn* siêu âm

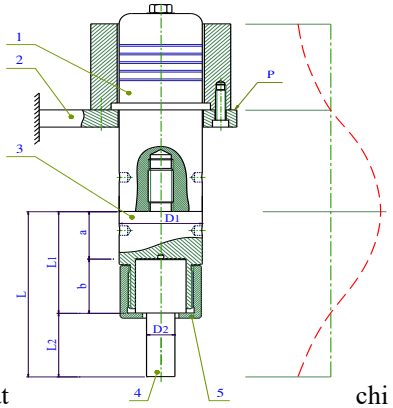
Thiết kế tối ưu *horn* siêu âm vẫn là thách thức quan trọng. Do ảnh hưởng trực tiếp đến biên độ dao động, điều kiện cộng hưởng và độ bền rung, hình dạng và kích thước *horn* có vai trò quyết định hiệu quả truyền dao động.



Hình 2.3 Điện cực GGraphite HK2

2.4.1 Cơ sở của thiết kế *horn*

Horn được thiết kế nhằm đạt cộng hưởng tại 20 kHz để tạo biên độ dao động lớn nhất tại bề mặt tiếp xúc với chi tiết, tương ứng vị trí bụng sóng của sóng dừng dọc. Đạt được bằng cách tối ưu hình học *horn* sao cho vị trí tiếp xúc nằm tại khoảng $\lambda/4$ tính từ nút sóng ở giao diện transducer–*horn*, qua đó khuếch đại dao động và nâng cao hiệu quả truyền năng lượng vào vùng gia công. Cấu trúc cụm đầu *horn* siêu âm (Hình 2.4). Bộ phát siêu âm (1) gắn trên đầu máy EDM (2), *horn* (3) được nối với transducer thông qua mối ren. *Horn* được thiết kế một lỗ đồng tâm để định vị và gá chặt tiết gia công (4) với việc cố định bằng đai ốc (5).



Hình 2.4 Thiết kế đầu rung siêu âm

1. Transducer; 2. Đầu máy EDM;
3. Horn; 4. Chi tiết gia công; 5. Đai ốc

2.4.2 Tính toán lý thuyết chiều dài đầu *horn*

Với thép 90CrSi, vận tốc truyền sóng được tính bởi công thức:

$$c = \sqrt{E/\rho} \rightarrow c = \sqrt{205 \cdot 10^9 / 7850} \approx 5110 \text{ m/s}$$

Bước sóng dọc tại tần số kích thích

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5110}{20000} = 255,5 \text{ mm}$$

$$L = \frac{\lambda}{2} = 127,75 \text{ mm}; \quad b = L - a - L_2$$

$$= 127,75 - 37 - 27$$

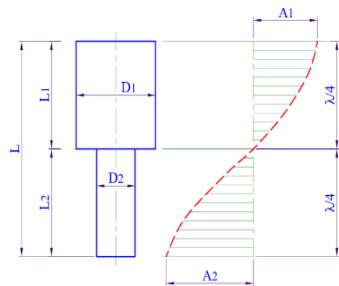
$$= 63,75 \text{ mm}$$

2.4.3 Xác định chiều dài đầu *horn* bằng thực nghiệm

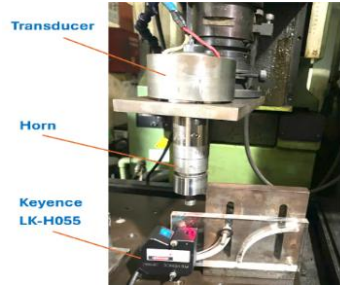
Bước 1: Xác định chiều dài cộng hưởng có biên độ lớn nhất bằng thực nghiệm

Dựa trên điều kiện cộng hưởng lý thuyết, chiều dài mục tiêu được tính là $L =$

Hình 2.5 Dạng dao động dọc của đầu *horn* hai bậc



127,75 mm. Bốn mẫu đầu *horn* nguyên công được chế tạo với các chiều dài tổng lần lượt là 125, 126, 127 và 128 mm. Chiều dài L được hiện thực bằng cách thay đổi tham số thiết kế b từ 61 đến 64 mm với bước tăng 1 mm, giữ cố định kích thước $a = 64$ trong biểu thức tổng chiều dài $L = a + b$. Biên độ dao động dọc trục của từng đầu *horn* được đo bằng cảm biến laser (Keyence LK-H055). Sơ đồ bố trí thí nghiệm được minh họa ở Hình 2.7. Kết quả đo biên độ tương ứng với các chiều dài khác nhau của đầu *horn* được tổng hợp trong Bảng 2.5. Ngoài ra, mối quan hệ giữa chiều dài đầu *horn* và biên độ dao động được biểu diễn trong Hình 2.8.



Hình 2.7 Setup đo biên độ dao động

Bước 2: Điều chỉnh chiều dài để thu được các mức biên độ khác nhau trong thiết kế thực nghiệm

Xây dựng thêm các cấu hình *horn* khác nhau để phục vụ cho thiết kế thực nghiệm Box-Behnken (BBD) trong giai đoạn tối ưu hóa UV-EDM.

Trong ma trận BBD, biên độ dao động siêu âm (A) được coi là một trong năm biến đầu vào, và cần được định nghĩa ở ba mức khác nhau nhằm xây dựng mô hình hồi quy bậc hai và phân tích các hiệu ứng phi tuyến tiềm năng.

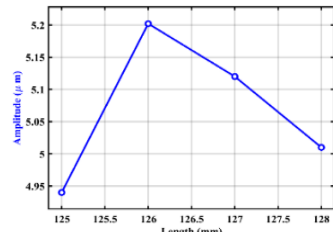
Bảng 2.1 Biên độ dao động của horn với $b = 61\div 64$ mm (bước = 1 mm)

b (mm)	L (mm)	A (μm)
64,0	128,0	5,01
63,0	127,0	5,12
62,0	126,0	5,20
61,0	125,0	4,94

Biên độ lớn nhất đo được ở Bước 1 là 5,2 μm tại chiều dài $L = 126$ mm, được chọn làm mức cao cho biến A .

Để xác định hai mức còn lại là 1,2 μm và 3,2 μm , các mẫu *horn* bổ sung được chế tạo bằng cách điều chỉnh tham số b , tức là thay đổi tổng chiều dài: $L = a + b$.

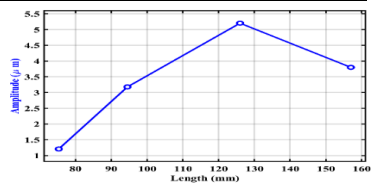
Các chiều dài *horn* tương ứng với các giá trị biên độ mục tiêu được trình bày trong Bảng 2.6. Mối quan hệ giữa chiều dài đầu *horn* và biên độ được minh họa trong Hình 2.9, cho thấy xu hướng phi tuyến và rất



Hình 2.8 Quan hệ giữa tổng chiều dài đầu horn L và biên độ dao động A (bước thô)

Bảng 2.2 Chiều dài horn (L) và biên độ dao động (A) thu được nhờ thay đổi b

b (mm)	L (mm)	A (μm)
11,30	75,30	1,21
30,50	94,50	3,18
62,00	126,00	5,20
93,00	157,00	3,80



Hình 2.9 Quan hệ giữa chiều dài horn (L) và biên độ dao động (A)

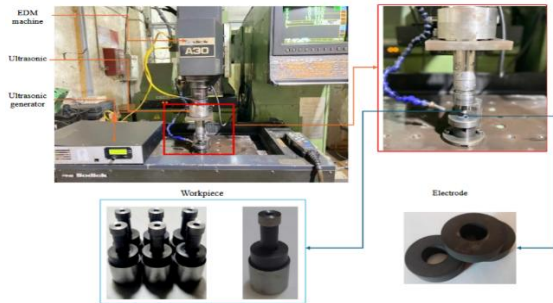
nhạy với điều kiện công hưởng.

2.5 Thiết kế thí nghiệm và thu thập dữ liệu

2.5.1 Thiết lập hệ thống thí nghiệm

Máy xung CNC Sodick, MarkA30. Hệ thống rung siêu âm được tích hợp từ nguồn phát MPI WG-3000 với công suất tối đa 3000 W, kết nối với bộ chuyển đổi rung siêu âm transducer RPS-5020-4Z có công suất 2000 W và tần số làm việc 20 kHz

Thiết kế thí nghiệm với 5 thông số công nghệ đầu vào: A , T_{on} , T_{off} , I_p , SV .



Hình 2.10 Setup thí nghiệm UV-EDM

2.5.2 Thiết bị đo lường

Độ nhám bề mặt Ra (μm): Đo bằng thiết bị Mitutoyo $SV3100$ (Nhật Bản).

Tốc độ bóc tách vật liệu MRR (g/h): Được tính toán từ khối lượng phôi trước và sau gia công, đo bằng cân điện tử WT3003NE (0,001 g). Thời gian gia công được ghi nhận trực tiếp từ chương trình điều khiển máy CNC.

Kính hiển vi kỹ thuật số PS-530G được sử dụng để chụp ảnh mặt cắt dọc của điện cực sau quá trình gia công EDM, phục vụ cho việc đo và phân tích độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR , mm/h).

2.5.3 Tiến hành thí nghiệm và thu thập dữ liệu

Năm thông số công nghệ đầu vào được khảo sát trong nghiên cứu (Bảng 2.7).

Toàn bộ dữ liệu đầu vào và đầu ra của 46 thí nghiệm được kiểm tra, xử lý trước khi nhập vào *MATLAB* để xây dựng mô hình hồi quy và thực hiện tối ưu hóa trong các phần tiếp theo. Kết quả thu được của Ra , MRR và HWR ứng với từng tổ hợp thông số công nghệ được trình bày trong Bảng 2.8.

Bảng 2.3 Thông số đầu vào

TT	Thông số đầu vào	Mức điều chỉnh			
1	Biên độ rung siêu âm	A (μm)	1,2	3,2	5,2
2	Thời gian phóng điện	T_{on} (μs)	8	12	16
3	Thời gian ngắt	T_{off} (μs)	8	12	16
4	Dòng điện xung	I_p (A)	5	10	15
5	Điện áp xung	SV (V)	4	5	6

Bảng 2.4 Kế hoạch và kết quả thí nghiệm

No.	A (μm)	T_{on} (μs)	T_{off} (μs)	I_p (A)	SV (V)	MRR (g/h)	Ra (μm)	HWR (mm/h)
1	1,2	8	12	10	5	3,527	2,327	1,031
2	1,2	16	12	10	5	5,898	3,806	0,286
3	5,2	8	12	10	5	5,764	3,565	0,947
4	5,2	16	12	10	5	7,437	3,878	0,423
5	3,2	12	8	5	5	4,472	4,046	0,069

6	3,2	12	8	15	5	8,427	5,548	0,593
7	3,2	12	16	5	5	3,844	3,879	0,368
8	3,2	12	16	15	5	7,941	4,627	0,691
9	3,2	8	12	10	4	5,738	2,201	0,890
10	3,2	8	12	10	6	6,019	2,767	1,235
11	3,2	16	12	10	4	9,391	4,835	0,055
12	3,2	16	12	10	6	9,182	3,039	0,452
13	1,2	12	8	10	5	4,351	3,945	0,509
14	1,2	12	16	10	5	3,531	3,070	0,489
15	5,2	12	8	10	5	6,380	3,846	1,026
16	5,2	12	16	10	5	4,933	3,553	0,437
17	3,2	12	12	5	4	3,659	4,201	0,356
18	3,2	12	12	5	6	3,810	3,927	0,250
19	3,2	12	12	15	4	8,024	5,981	0,854
20	3,2	12	12	15	6	8,017	6,189	0,754
21	3,2	8	8	10	5	6,081	1,915	1,553
22	3,2	8	16	10	5	6,323	1,838	1,329
23	3,2	16	8	10	5	9,737	5,153	0,966
24	3,2	16	16	10	5	8,178	4,662	0,065
25	1,2	12	12	5	5	2,582	4,405	0,109
26	1,2	12	12	15	5	5,488	4,815	1,079
27	5,2	12	12	5	5	3,436	4,080	0,189
28	5,2	12	12	15	5	7,274	4,574	0,861
29	3,2	12	8	10	4	9,035	3,174	0,928
30	3,2	12	8	10	6	6,832	3,128	0,432
31	3,2	12	16	10	4	7,255	3,464	0,331
32	3,2	12	16	10	6	7,068	4,003	1,064
33	1,2	12	12	10	4	4,510	4,059	0,415
34	1,2	12	12	10	6	5,475	3,205	0,385
35	5,2	12	12	10	4	4,879	3,091	0,272
36	5,2	12	12	10	6	5,066	3,792	0,251
37	3,2	8	12	5	5	2,703	2,093	0,568
38	3,2	8	12	15	5	5,674	3,461	1,411
39	3,2	16	12	5	5	6,862	1,818	0,163
40	3,2	16	12	15	5	10,239	10,627	0,335
41	3,2	12	12	10	5	6,426	4,098	0,195
42	3,2	12	12	10	5	7,386	3,976	0,699
43	3,2	12	12	10	5	7,481	3,913	0,293
44	3,2	12	12	10	5	7,634	4,020	0,273
45	3,2	12	12	10	5	6,282	3,859	0,222
46	3,2	12	12	10	5	7,717	3,969	0,477

Kết luận chương 2

- Đề xuất cấu hình *UV-EDM* truyền rung siêu âm trực tiếp vào phôi thông qua horn chuyên dụng nhằm khắc phục hạn chế của điện cực graphite và nâng cao độ ổn định phóng điện.

- Thiết kế và tối ưu hóa đầu horn bằng phương pháp kết hợp tính toán – thực nghiệm, đạt điều kiện cộng hưởng tại chiều dài 126 mm với biên độ 5,2 μm ; đồng thời xác lập các mức biên độ phục vụ thiết kế thí nghiệm Box–Behnken.

- Kết quả thu được là cơ sở để đánh giá định lượng ảnh hưởng của biên độ siêu âm đến *MRR*, độ nhám bề mặt (*Ra*) và tốc độ mòn điện cực (*HWR*).

- Lựa chọn cấu hình rung dọc trục truyền vào phôi thép 90CrSi nhằm cải thiện khả năng thoát phoi và nâng cao độ ổn định trong gia công bề mặt trụ ngoài.

Chương 3. TỐI ƯU HOÁ ĐƠN MỤC TIÊU *Ra*, *MRR*, *HWR*

3.1 Mô hình hóa quá trình bằng phương pháp *RSM* và *GPR*

Phương pháp bề mặt đáp ứng (*RSM*) được sử dụng để thiết lập mô hình hồi quy bậc hai phục vụ tối ưu hóa đơn mục tiêu; *GPR* được áp dụng nhằm tăng cường khả năng mô tả tính phi tuyến và nâng cao độ chính xác dự đoán khi *RSM* chưa đáp ứng đầy đủ.

3.1.1 Cơ sở lý thuyết của *RSM*

Dạng tổng quát của mô hình hồi quy bậc hai với *k* biến đầu vào:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.1)$$

3.1.2 Phân tích phương sai (*ANOVA*) và độ tin cậy mô hình

Mô hình độ nhám bề mặt (*Ra*)

Bảng 3.1 trình bày các hệ số hồi quy và giá trị *p* cho mô hình *Ra* (μm). Mô hình hồi quy bậc hai cho *Ra* có hệ số xác định: $R^2 = 0,7868$ và $R_{adjusted}^2 = 0,6163$, cho thấy mô hình chỉ giải thích được khoảng 78,7% phương sai của dữ liệu đầu ra. Trong số các yếu tố đầu vào, dòng điện xung (I_p) có ảnh hưởng đáng kể đến *Ra* với giá trị $p = 0,0189$. Ngoài ra, hiệu ứng tương tác giữa T_{on} và I_p cũng thể hiện ý nghĩa thống kê cao ($p = 0,0003$), cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa T_{on} và *Ra*.

Bảng 3.1 Hệ số hồi quy và giá trị *p* cho mô hình *Ra* (μm)

Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị <i>p</i>	Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị <i>p</i>
(Intercept)	-4,2282	0,7948	$T_{on} \times I_p$	0,0930	0,0003
<i>A</i>	0,4510	0,7807	$T_{on} \times SV$	-0,1476	0,1889
T_{on}	0,9525	0,2576	$T_{off} \times IP$	-0,0094	0,6702
T_{off}	0,3270	0,6943	$T_{off} \times SV$	0,0366	0,7406
IP	-1,5898	0,0189	$I_p \times SV$	0,0241	0,7848
SV	2,1176	0,5676	A^2	-0,0778	0,3965
$A \times T_{on}$	-0,0604	0,2730	T_{on}^2	-0,0260	0,1718
$A \times T_{off}$	0,0098	0,8571	T_{off}^2	-0,0163	0,3866
$A \times I_p$	-0,0252	0,5645	I_p^2	0,0376	0,0039
$A \times SV$	0,1874	0,3926	SV^2	-0,1604	0,5926
$T_{on} \times T_{off}$	-0,0065	0,8151			

Mô hình tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*)

Mô hình cho *MRR* thể hiện chất lượng rất cao với: $R^2 = 0,9250$ và $R_{adjusted}^2 = 0,8649$ (Bảng 3.2), hơn 92% độ biến thiên của *MRR* được giải thích bởi mô hình. Các yếu tố ảnh hưởng đến *MRR* bao gồm biên độ (*A*) với $p = 0,0004$ và I_p với $p = 0,0487$. Ngoài ra, thành phần bậc hai của *A* và I_p có ý nghĩa thống kê rõ rệt: $p < 0,0005$ phản ánh ảnh hưởng phi tuyến mạnh của hai biến này đến *MRR*.

Bảng 3.2 Hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình MRR (g/h)

Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p	Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p
(Intercept)	-8,1350	0,5389	$T_{on} \times I_p$	0,0051	0,7773
A	5,3330	0,0004	$T_{on} \times SV$	-0,0306	0,7330
T_{on}	0,3793	0,5750	$T_{off} \times I_p$	0,0018	0,9215
T_{off}	-0,3624	0,5921	$T_{off} \times SV$	0,1260	0,1679
I_p	1,0653	0,0487	$I_p \times SV$	-0,0079	0,9122
SV	-0,8404	0,7794	A^2	-0,6437	0,0000
$A \times T_{on}$	-0,0427	0,3385	T_{on}^2	0,0238	0,1260
$A \times T_{off}$	-0,0255	0,5650	T_{off}^2	0,0011	0,9448
$A \times I_p$	0,0167	0,6381	I_p^2	-0,0391	0,0004
$A \times SV$	-0,0367	0,8357	SV^2	-0,0188	0,9382
$T_{on} \times T_{off}$	-0,0281	0,2163			

Mô hình tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR)

Bảng 3.3 Hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình HWR (μm)

Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p	Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p
(Intercept)	8,5578	0,0479	$T_{on} \times I_p$	-0,0084	0,1466
A	0,1298	0,7541	$T_{on} \times SV$	0,0033	0,9077
T_{on}	-0,3594	0,0999	$T_{off} \times I_p$	-0,0025	0,6562
T_{off}	-0,5212	0,0203	$T_{off} \times SV$	0,0768	0,0110
I_p	0,1681	0,3093	$I_p \times SV$	0,0003	0,9894
SV	-1,4459	0,1346	A^2	0,0103	0,6589
$A \times T_{on}$	0,0094	0,5016	T_{on}^2	0,0179	0,0008
$A \times T_{off}$	-0,0196	0,1665	T_{off}^2	0,0135	0,0087
$A \times I_p$	-0,0030	0,7883	I_p^2	0,0013	0,6743
$A \times SV$	-0,0081	0,8836	SV^2	0,0550	0,4746
$T_{on} \times T_{off}$	-0,0106	0,1425			

Bảng 3.3 trình bày các hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình HWR (mm/h). Mô hình HWR có mức độ phù hợp trung bình với: $R^2 = 0,8166$ và $R_{adjusted}^2 = 0,6699$. Các yếu tố ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê bao gồm thời gian ngắt xung (T_{off}) với $p = 0,0203$, và tương tác giữa T_{off} và SV với $p = 0,0110$. Ngoài ra, các thành phần bậc hai của T_{on} và T_{off} cũng có ảnh hưởng rõ rệt đến HWR ($p = 0,0008$ và $p = 0,0087$ tương ứng), chứng tỏ tính phi tuyến của quá trình mòn điện cực theo phương đứng.

Tổng quan đánh giá mô hình: mô hình hồi quy bậc hai xây dựng cho các hàm mục tiêu Ra , MRR và HWR phản ánh được xu hướng chung của dữ liệu thực nghiệm trong không gian khảo sát. Mô hình MRR cho độ phù hợp cao ($R^2 = 0,9250$; $R_{adjusted}^2 = 0,8649$), trong đó biên độ rung A và I_p có ảnh hưởng phi tuyến đáng kể. Ngược lại, các mô hình Ra và HWR chỉ đạt mức phù hợp trung bình ($R_{adjusted}^2$ lần lượt là 0,6163 và 0,6699).

Do đó, mô hình (GPR) được áp dụng ở các mục tiếp theo nhằm nâng cao độ chính xác dự đoán và hiệu quả tối ưu hóa hai chỉ tiêu này.

3.2 Mô hình hóa ba hàm mục tiêu bằng RSM

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm từ thiết kế Box–Behnken và kết quả phân tích hồi quy bậc hai bằng phương pháp RSM , các phương trình mô tả mối quan hệ giữa

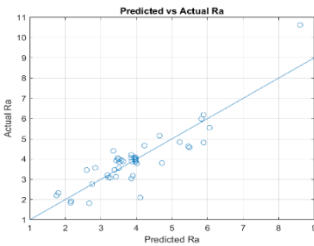
năm thông số công nghệ đầu vào ($A, T_{on}, T_{off}, I_p, SV$) với ba chỉ tiêu đầu ra (Ra, MRR và HWR) đã được xây dựng. Các phương trình này có thể được sử dụng để dự đoán kết quả đầu ra với độ chính xác cao trong phạm vi khảo sát.

3.2.1 Mô hình độ nhám bề mặt (Ra)

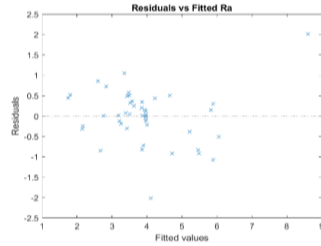
Phương trình hồi quy bậc hai cho Ra (μm) như sau:

$$\begin{aligned} Ra = & -4.2282 + 0.4510A + 0.9525T_{on} + 0.3270T_{off} - 1.5898IP + 2.1176SV \\ & - 0.0604A \cdot T_{on} + 0.0098A \cdot T_{off} - 0.0252A \cdot IP + 0.1874A \cdot SV \\ & - 0.0065T_{on} \cdot T_{off} + 0.0930T_{on} \cdot IP - 0.1476T_{on} \cdot SV \\ & - 0.0094T_{off} \cdot IP + 0.0366T_{off} \cdot SV + 0.0241IP \cdot SV \\ & - 0.0778A^2 - 0.0260T_{on}^2 - 0.0163T_{off}^2 + 0.0376IP^2 - 0.1604SV^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Độ phù hợp của mô hình được minh họa bằng đồ thị so sánh giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm (Hình 3.4) cùng biểu đồ phần dư (residuals) (Hình 3.5).



Hình 3.4 Quan hệ giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán Ra



Hình 3.5 Phân bố phần dư theo giá trị dự đoán của Ra

Hình 3.4 cho thấy các điểm dữ liệu phân bố tập trung quanh đường chéo 45°, thể hiện sự tương đồng tương đối tốt giữa giá trị Ra dự đoán và thực nghiệm. Một số sai lệch xuất hiện ở vùng Ra cao, nhưng xu hướng chung vẫn được mô hình tái hiện ổn định. Giá trị $R^2_{adjusted} = 0,6163$ xác nhận mô hình giải thích được khoảng 61,63% biến thiên của Ra , mức phù hợp trung bình đối với đặc tính nhiễu và phi tuyến của quá trình EDM. Hình 3.5 củng cố đánh giá này khi phần dư phân bố ngẫu nhiên quanh trục zero và không xuất hiện xu hướng hay hiện tượng phương sai thay đổi. Những quan sát này cho thấy mô hình có độ phù hợp thống kê và độ tin cậy trung bình để sử dụng trong phân tích và dự báo Ra trong phạm vi nghiên cứu.

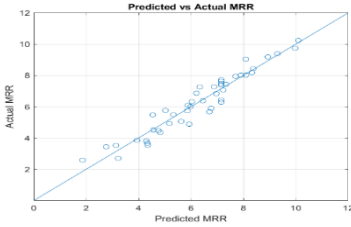
3.2.2 Mô hình tốc độ bóc tách vật liệu (MRR)

Phương trình hồi quy bậc hai cho MRR (g/h):

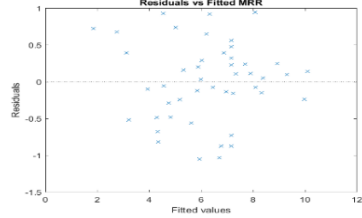
$$\begin{aligned} MRR = & -8.1350 + 5.3330A + 0.3793T_{on} - 0.3624T_{off} + 1.0653IP - 0.8404SV \\ & - 0.0427A \cdot T_{on} - 0.0255A \cdot T_{off} + 0.0167A \cdot IP - 0.0367A \cdot SV \\ & - 0.0281T_{on} \cdot T_{off} + 0.0051T_{on} \cdot IP - 0.0306T_{on} \cdot SV \\ & + 0.0018T_{off} \cdot IP + 0.1260T_{off} \cdot SV - 0.0079IP \cdot SV \\ & - 0.6437A^2 + 0.0238T_{on}^2 + 0.0011T_{off}^2 - 0.0391IP^2 - 0.0188SV^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Độ phù hợp của mô hình được minh họa bằng đồ thị so sánh giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm (Hình 3.6) cùng biểu đồ phần dư (residuals) (Hình 3.7). Kết quả mô hình hóa cho thấy giá trị MRR dự đoán bám sát giá trị thực nghiệm, thể hiện sự phân bố của các điểm dữ liệu dọc theo đường chéo trên đồ thị Predicted–Actual. Đồ thị phần dư cho thấy các phần dư phân bố ngẫu nhiên quanh giá trị “0”, không xuất hiện xu hướng hay hiện tượng thay đổi phương sai, qua đó khẳng định

các giả định cơ bản của mô hình hồi quy được thỏa mãn. Giá trị $R^2 = 0,9250$ và $R^2_{adjusted} = 0,8649$ chứng tỏ mô hình có mức độ giải thích cao và không xảy ra hiện tượng quá khớp.



Hình 3.6 Quan hệ giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán MRR



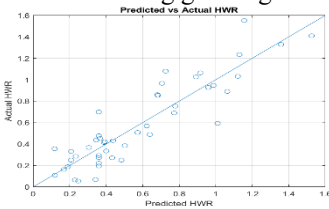
Hình 3.7 Phân bố phần dư theo giá trị dự đoán của MRR

3.2.3 Mô hình tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR)

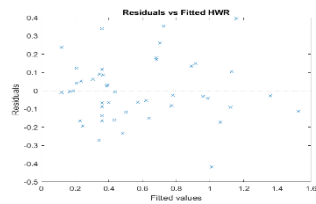
Phương trình hồi quy bậc hai cho HWR (mm/h):

$$\begin{aligned}
 HWR = & 8.5578 + 0.1298A - 0.3594Ton - 0.5212Toff + 0.1681IP - 1.4459SV \\
 & + 0.0094A \cdot Ton - 0.0196A \cdot Toff - 0.0030A \cdot IP - 0.0081A \cdot SV \\
 & - 0.0106Ton \cdot Toff - 0.0084Ton \cdot IP + 0.0033Ton \cdot SV \\
 & - 0.0025Toff \cdot IP + 0.0768Toff \cdot SV + 0.0003IP \cdot SV \\
 & + 0.0103A^2 + 0.0179Ton^2 + 0.0135Toff^2 + 0.0013IP^2 + 0.0550SV^2
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Mức độ phù hợp của mô hình HWR được thể hiện qua Hình 3.8 và Hình 3.9. Các điểm dữ liệu dự đoán–thực nghiệm phân bố tương đối gần đường chéo, cho thấy mô hình có mức độ phù hợp chấp nhận được trong miền khảo sát. Phần dư phân bố ngẫu nhiên quanh giá trị “0”, không xuất hiện xu hướng hay sự thay đổi phương sai rõ rệt, qua đó thỏa mãn các giả định cơ bản của mô hình hồi quy. Tuy nhiên, với $R^2_{adjusted} = 0,6699$, mô hình chỉ giải thích được khoảng 67% biến thiên của HWR , thấp hơn so với mô hình MRR , phản ánh đặc tính biến động mạnh và khó dự đoán của chỉ tiêu HWR trong gia công EDM.



Hình 3.8 Quan hệ giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán HWR



Hình 3.9 Phân bố phần dư theo giá trị dự đoán của HWR

3.3 Cải thiện mô hình dự đoán bằng Gaussian Process Regression(GPR)

3.3.1 Cơ sở lý thuyết

Gaussian Process Regression (GPR) là một kỹ thuật học máy phi tham số mạnh mẽ, đặc biệt hiệu quả với các bài toán mô hình hóa phi tuyến có độ phức tạp cao. GPR không chỉ đưa ra dự đoán điểm mà còn cung cấp độ tin cậy thông qua phân phối xác suất, rất hữu ích khi dữ liệu chứa nhiễu hoặc không tuyến tính rõ ràng.

Trong nghiên cứu này, *GPR* được sử dụng thay thế cho *RSM* để dự đoán *Ra* và *HWR* – hai đầu ra mà mô hình hồi quy bậc hai trước đó thể hiện độ phù hợp chưa cao.

3.3.2 Huấn luyện mô hình *GPR* và lựa chọn hàm kernel tối ưu

Mô hình *GPR* đối với *MRR*, *Ra* và *HWR* được xây dựng bằng cách kết hợp nhiều loại kernel. Được thực hiện bằng chương trình *MATLAB* sử dụng hàm `fitrgp`, trong đó các siêu tham số của mô hình được tối ưu thông qua tối đa hóa hàm hợp lý biên. Sau khi huấn luyện, từng cấu hình *GPR* được đánh giá và so sánh dựa trên các chỉ tiêu thống kê để lựa chọn mô hình tối ưu cho mỗi đại lượng đầu ra. Nhiều cấu hình đạt độ chính xác rất cao, trong đó các mô hình sử dụng kernel Rational Quadratic hoặc Matérn 3/2 kết hợp với hàm cơ sở constant hoặc pure quadratic cho hệ số xác định gần như tuyệt đối. Trên cơ sở cân nhắc đồng thời độ chính xác và tính ổn định, cấu hình Rational Quadratic – pureQuadratic được lựa chọn làm mô hình *GPR* tối ưu cho *Ra*.

Các mô hình sử dụng kernel Matérn 5/2, Matérn 3/2 hoặc Rational Quadratic kết hợp với hàm cơ sở tuyến tính hoặc bậc hai đều cho kết quả dự đoán tốt, với R^2 và R^2_{adj} xấp xỉ 0,99. Trong số đó, cấu hình Matérn 5/2 – linear được lựa chọn do vừa đạt độ chính xác cao, vừa phản ánh hợp lý xu hướng biến thiên của *MRR*.

Các mô hình sử dụng kernel Matérn 5/2 hoặc Rational Quadratic kết hợp với hàm cơ sở tuyến tính cho kết quả dự đoán tốt nhất, với R^2 xấp xỉ 0,97. Cấu hình Matérn 5/2 – linear được lựa chọn làm mô hình *GPR* tối ưu cho *HWR*, do khả năng mô tả hiệu quả xu hướng *HWR* trong miền khảo sát.

3.3.3 Đánh giá độ chính xác mô hình

a) Đánh giá mô hình *GPR* cho tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*)

Các điểm dữ liệu phân bố tập trung xung quanh đường chéo lý tưởng, cho thấy sai lệch dự đoán nhỏ và không xuất hiện xu hướng lệch có hệ thống trong toàn miền

```
=== GPR Ra Comparison (Kernel x Basis) ===
```

kernel	basis	R ²	R ² adj
squareexponential	constant	0.9996	0.9996
squareexponential	linear	0.9907	0.9895
squareexponential	pureQuadratic	0.5928	0.5419
rationalquadratic	constant	0.9858	0.9840
rationalquadratic	linear	0.9996	0.9996
rationalquadratic	pureQuadratic	0.9996	0.9996
matern32	constant	0.9996	0.9996
matern32	linear	0.9780	0.9753
matern32	pureQuadratic	0.9996	0.9996
matern52	constant	0.9491	0.9427
matern52	linear	0.9768	0.9739
matern52	pureQuadratic	0.5928	0.5419

Hình 3.10 So sánh các cấu hình mô hình *GPR* cho *Ra*

```
=== GPR MRR Comparison (Kernel x Basis) ===
```

kernel	basis	R ²	R ² adj
squareexponential	constant	0.9375	0.9297
squareexponential	linear	0.9881	0.9866
squareexponential	pureQuadratic	0.9881	0.9866
rationalquadratic	constant	0.9429	0.9357
rationalquadratic	linear	0.9881	0.9866
rationalquadratic	pureQuadratic	0.9881	0.9866
matern32	constant	0.9881	0.9866
matern32	linear	0.9881	0.9866
matern32	pureQuadratic	0.9881	0.9866
matern52	constant	0.9873	0.9858
matern52	linear	0.9881	0.9866
matern52	pureQuadratic	0.9881	0.9866

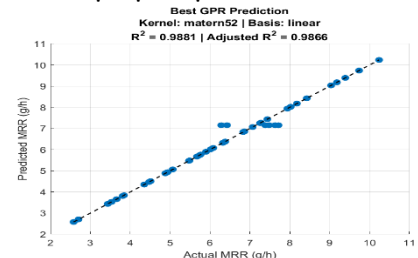
Hình 3.11 So sánh các cấu hình mô hình *GPR* cho *MRR*

```
=== GPR HWR Comparison (Kernel x Basis) ===
```

kernel	basis	R ²	R ² adj
squareexponential	constant	0.9726	0.9691
squareexponential	linear	0.9940	0.9897
squareexponential	pureQuadratic	0.9725	0.9691
rationalquadratic	constant	0.9726	0.9691
rationalquadratic	linear	0.9726	0.9691
rationalquadratic	pureQuadratic	0.7074	0.6798
matern32	constant	0.8727	0.8568
matern32	linear	0.9686	0.9647
matern32	pureQuadratic	0.9725	0.9691
matern52	constant	0.8670	0.8504
matern52	linear	0.9726	0.9691
matern52	pureQuadratic	0.9666	0.9624

Hình 3.12 So sánh các cấu hình mô hình *GPR* cho *HWR*

tuyến tính cho kết quả dự đoán tốt nhất, với R^2 xấp xỉ 0,97. Cấu hình Matérn 5/2 – linear được lựa chọn làm mô hình *GPR* tối ưu cho *HWR*, do khả năng mô tả hiệu quả xu hướng *HWR* trong miền khảo sát.

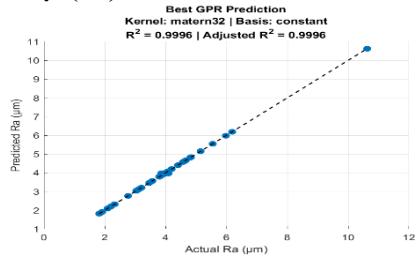


Hình 3.13 Mô hình *GPR* cho *MRR*

khảo sát. Giá trị hệ số: $R^2 = 0,9881$, $R_{adj}^2 = 0,9866$. Các giá trị này chứng tỏ mô hình GPR mô tả rất tốt mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số công nghệ và MRR.

b) Đánh giá mô hình GPR cho độ nhám bề mặt (R_a)

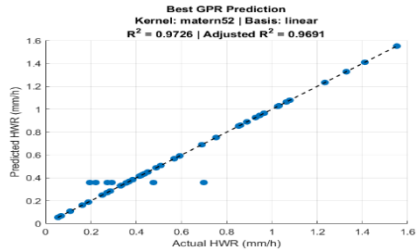
Mô hình GPR tối ưu sử dụng kernel Rational Quadratic kết hợp với hàm cơ sở hằng số, cho thấy khả năng khớp gần như hoàn hảo với dữ liệu thực nghiệm. Chỉ số: $R^2 = 0,9996$, $R_{adj}^2 = 0,9996$. Giá trị R^2 và R_{adj}^2 gần bằng 1 phản ánh khả năng mô hình hóa xuất sắc của GPR đối với chỉ tiêu R_a .



Hình 3.14 Mô hình GPR cho R_a

c) Đánh giá mô hình GPR cho tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR)

Các điểm dữ liệu phân bố khá đều quanh đường chéo lý tưởng, đặc biệt trong vùng HWR thấp – vùng có ý nghĩa thực tiễn quan trọng đối với gia công tinh và kéo dài tuổi thọ điện cực đối với chỉ tiêu R_a . Các chỉ số: $R^2 = 0,9726$, $R_{adj}^2 = 0,9691$. Độ phân tán của dữ liệu HWR lớn hơn so với R_a , mô hình GPR vẫn thể hiện khả năng dự đoán đáng tin cậy, với sai lệch nhỏ và không xuất hiện xu hướng sai lệch có hệ thống.



Hình 3.15 Mô hình GPR cho HWR

3.3.4 Tối ưu hóa đơn mục tiêu bằng mô hình GPR

a) Tối ưu hóa đơn mục tiêu tốc độ bóc tách vật liệu (MRR)

Mô hình GPR tối ưu cho MRR sử dụng hàm nhân Matern 5/2 (matern52) kết hợp với hàm cơ sở tuyến tính (linear), đạt độ chính xác cao với $R^2 = 0,9881$ và $R_{adj}^2 = 0,9866$. Kết quả tối ưu từ *MATLAB* cho thấy MRR cực đại dự đoán đạt 10,6379 g/h tại bộ thông số công nghệ: $A = 5,2 \mu\text{m}$; $T_{on} = 16 \mu\text{s}$; $T_{off} = 8 \mu\text{s}$; $I_p = 15 \text{A}$; $SV = 4 \text{V}$.

b) Tối ưu hóa đơn mục tiêu độ nhám bề mặt (R_a)

Mô hình GPR tối ưu cho R_a sử dụng hàm nhân Rational Quadratic (matern32) kết hợp với hàm cơ sở hằng số (constant), cho độ phù hợp gần như tuyệt đối với $R^2 = 0,9996$ và $R_{adj}^2 = 0,9996$. Kết quả tối ưu cho thấy R_a nhỏ nhất dự đoán đạt 2,0407 μm tại bộ thông số công nghệ: $A = 2,938 \mu\text{m}$; $T_{on} = 8 \mu\text{s}$; $T_{off} = 12,083 \mu\text{s}$; $I_p = 5,7544 \text{A}$; $SV = 4,7723 \text{V}$.

c) Tối ưu hóa đơn mục tiêu tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR)

Mô hình GPR tối ưu cho HWR sử dụng hàm nhân Matern 5/2 (matern52) kết hợp với hàm cơ sở tuyến tính (linear), đạt $R^2 = 0,9726$ và $R_{adj}^2 = 0,9691$. Kết quả tối ưu cho thấy HWR nhỏ nhất dự đoán đạt 0,0400 mm/h tại bộ thông số công nghệ: $A = 3,1863 \mu\text{m}$; $T_{on} = 15,8063 \mu\text{s}$; $T_{off} = 12,7397 \mu\text{s}$; $I_p = 8,0780 \text{A}$; $SV = 4,0000 \text{V}$.

3.3.5 Kiểm chứng thực nghiệm:

- Bộ thông số tối đa hóa *MRR*:

$A = 5,2 \mu\text{m}$, $T_{on} = 16 \mu\text{s}$, $T_{off} = 8 \mu\text{s}$, $I_p = 15 \text{ A}$, $SV = 4 \text{ V}$. *MRR* thu được từ thực nghiệm: 10,24 (g/h); Sai số so với giá trị dự đoán ($MRR = 10,6379 \mu\text{m}$): 3,74 %, Sai số này khá nhỏ, cho phép khẳng định độ tin cậy của mô hình *GPR*.

- Bộ thông số tối thiểu hóa *Ra*:

$A = 2,94 \mu\text{m}$, $T_{on} = 8 \mu\text{s}$, $T_{off} = 12 \mu\text{s}$, $I_p = 5,75 \text{ A}$, $SV = 4,8 \text{ V}$. *Ra* thu được từ thực nghiệm: 2,17 μm ; Sai số so với giá trị dự đoán ($Ra = 2,0407 \mu\text{m}$): 5,96 %, Sai số này không nhiều, cho phép khẳng định độ tin cậy của mô hình *GPR*.

- Bộ thông số tối thiểu hóa *HWR*:

$A = 3,1863 \mu\text{m}$; $T_{on} = 15,8063 \mu\text{s}$; $T_{off} = 12,7397 \mu\text{s}$; $I_p = 8,078 \text{ A}$; $SV = 4,00 \text{ V}$. *HWR* thu được từ thực nghiệm 0,043 mm/h; Sai số so với giá trị dự đoán ($HWR = 0,04 \mu\text{m}$) là 6,97 %. Sai số này trong phạm vi cho phép nên có thể nói mô hình *GPR* trong dự đoán *HWR* là tin cậy.

3.4 Phân tích ảnh hưởng các yếu tố đầu vào

3.4.1 Cơ sở và phương pháp phân tích

Biểu đồ ảnh hưởng chính (Main Effect Plots); Biểu đồ cột hiệu ứng (Effect Bar Plots); Biểu đồ đường đồng mức (Contour Plots). Tổng hợp ảnh hưởng các thông số đầu vào đến ba đầu ra *Ra*, *MRR*, *HWR* được thể hiện ở bảng 3.4

Bảng 3.4 Tổng hợp ảnh hưởng các thông số đầu vào đến ba đầu ra *Ra*, *MRR*, *HWR*

Thông số	Ảnh hưởng đến <i>Ra</i>	Ảnh hưởng đến <i>MRR</i>	Ảnh hưởng đến <i>HWR</i>	Gợi ý tối ưu (trade-off)
I_p	↗ Rất mạnh (tăng <i>Ra</i>)	↗ Rất mạnh (tăng <i>MRR</i>)	↗ Rất mạnh (tăng <i>HWR</i>)	Chọn mức trung bình ÷ cao để tăng <i>MRR</i> nhưng cần kiểm soát để không tăng <i>Ra</i> và <i>HWR</i> quá mức.
T_{on}	↗ Mạnh (tăng <i>Ra</i>)	↗ Mạnh (tăng <i>MRR</i>)	↘ Mạnh (giảm <i>HWR</i>)	Chọn mức cao: tăng <i>MRR</i> và giảm <i>HWR</i> , nhưng cần bù lại để kiểm soát <i>Ra</i> .
T_{off}	⊙ Trung bình (phi tuyến)	↘ Nhẹ (giảm <i>MRR</i> nếu quá lớn)	↘ Nhẹ (giảm <i>HWR</i>)	Chọn mức tối ưu $\approx 12 \mu\text{s}$ để cân bằng cả 3 chỉ tiêu.
SV	⊙ Yếu (có điểm tối ưu)	⊙ Yếu (hiệu ứng ổn định)	↗ Rất nhẹ (tăng nhẹ <i>HWR</i>)	Giữ mức ổn định 4,8 ÷ 5 V, tránh <i>SV</i> quá thấp hoặc quá cao.
A (biên độ)	↘ Phi tuyến (tối ưu $\sim 3 \div 4 \mu\text{m}$)	↗ Phi tuyến (tăng <i>MRR</i>)	⊙ Rất nhẹ	Chọn $A \approx 3 \div 3,5 \mu\text{m}$ để giảm <i>Ra</i> , tăng <i>MRR</i> và không ảnh hưởng đến <i>HWR</i> .

3.5 Tối ưu hóa đơn mục tiêu tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*)

3.5.1 Xác định bộ thông số tối ưu từ mô hình *RSM*

Bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu được giải bằng công cụ *fmincon* trong *MATLAB*, với mục tiêu tối đa hóa *MRR* trong giới hạn thực nghiệm:

$$1,2 \leq A \leq 5,2; 8 \leq T_{on}; T_{off} \leq 16; 5 \leq I_p \leq 15 \text{ và } 4 \leq SV \leq 6$$

Để thuận tiện cho tính toán, hàm mục tiêu được đảo dấu để chuyển sang bài toán tối thiểu hóa hàm $-MRR$. Kết quả tối ưu thu được như sau: $A = 1,53 \mu\text{m}$; $T_{on} =$

16,00 μ s; T_{off} = 8,00 μ s; I_p = 15,00 A; SV = 4,00 V. Với bộ thông số này, mô hình RSM dự đoán: MRR tối đa đạt được: 12,1989 g/h,

3.5.2 Kiểm chứng thực nghiệm

$A = 1,52 \mu$ m; $T_{on} = 16 \mu$ s; $T_{off} = 8 \mu$ s; $I_p = 15$ A; $SV = 4$ V.

Khối lượng chi tiết trước và sau thí nghiệm được xác định bằng cân điện tử để tính toán tốc độ bóc tách vật liệu (MRR). Kết quả được MRR từ thực nghiệm bằng 11,572 g/h, Do vậy sai số so với giá trị dự đoán của mô hình là:

$$(12,1989 - 11,572) * 100 / 11,572 = 5,42 \%$$

Kết luận chương 3

- Thực hiện mô hình hóa và tối ưu hóa đơn mục tiêu quá trình $UV-EDM$ trên thép 90CrSi với các chỉ tiêu Ra , MRR và HWR .

- Dòng điện xung và thời gian phóng điện là các thông số ảnh hưởng chi phối; các thông số còn lại có vai trò điều tiết và ổn định quá trình.

- Tối ưu Ra ưu tiên năng lượng xung thấp, cải thiện chất lượng bề mặt nhưng làm giảm MRR . Tối ưu MRR yêu cầu năng lượng phóng điện cao, dẫn đến tăng Ra và HWR . Tối ưu HWR đạt được khi hạn chế tác động nhiệt lên điện cực.

- Không tồn tại bộ thông số tối ưu đồng thời cho cả ba chỉ tiêu; các kết quả tối ưu đơn mục tiêu là cơ sở cho bài toán tối ưu đa mục tiêu ở Chương 4.

Chương 4. TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU

4.1 Giới thiệu

Quá trình EDM tồn tại mâu thuẫn nội tại giữa MRR và Ra , do đó cần tiếp cận theo hướng tối ưu hóa đa mục tiêu. Các nghiên cứu về tối ưu hóa đa mục tiêu $UV-EDM$ cho bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi sử dụng điện cực graphite còn rất hạn chế. Vì vậy, nghiên cứu này tập trung giải quyết bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu $UV-EDM$ nhằm đồng thời tối đa hóa MRR và tối thiểu hóa Ra , HWR , đáp ứng yêu cầu về chất lượng gia công và hiệu quả kinh tế.

4.2 Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng một quy trình tối ưu hóa đa mục tiêu bao gồm các bước: Thiết kế thí nghiệm; Xử lý dữ liệu đầu ra bằng biến đổi Box-Cox; Mô hình hóa bằng Gaussian Process Regression (GPR); Giải bài toán tối ưu đa mục tiêu bằng thuật toán $NSGA-II$, và lựa chọn phương án tối ưu bằng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí ($MCDM$).

4.2.1 Thiết kế thí nghiệm và thu thập dữ liệu

(Dữ liệu thực nghiệm được thiết kế và thu thập như đã trình bày ở mục 2.5.)

4.2.2 Biến đổi dữ liệu đầu ra bằng Box-Cox

Các giá trị đầu ra MRR , Ra và HWR được biến đổi bằng công thức trên với λ thay đổi trong khoảng từ -2 đến 2 . Tham số λ tối ưu được lựa chọn là giá trị cho độ lệch tuyệt đối nhỏ nhất. Cụ thể:

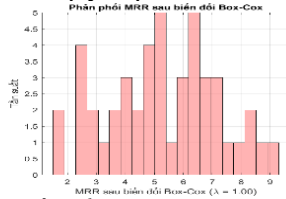
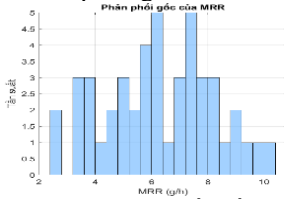
• MRR có λ tối ưu = 1,00 tức là không cần biến đổi (phân phối góc đã tương đối chuẩn).

• Ra có λ tối ưu $\approx 0,00$ tức là nên áp dụng biến đổi logarit: $\log(Ra)$.

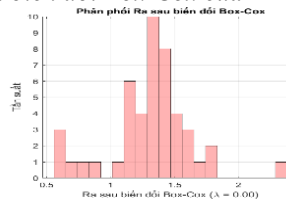
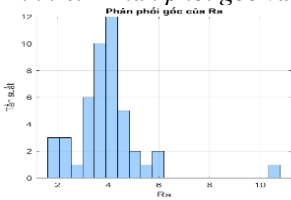
• HWR có λ tối ưu $\approx 0,4$ tức là nên áp dụng nén để giảm độ lệch dương.

$$Y^{(0,4)} = \frac{Y^{0,4}-1}{0,4} \quad (4.3)$$

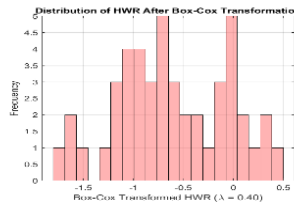
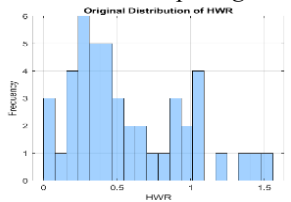
• Phân phối trước và sau biến đổi được trình bày lần lượt trong Hình 4.1, Hình 4.2 và Hình 4.3. Kết quả cho thấy độ lệch phân phối đã được giảm đáng kể, giúp đảm bảo điều kiện áp dụng cho các mô hình hồi quy tiếp theo như *GPR*.



Hình 4.1 Phân phối gốc và sau biến đổi Box-Cox của MRR



Hình 4.2 Phân phối gốc và sau biến đổi Box-Cox của Ra



Hình 4.3 Phân phối gốc và sau biến đổi Box-Cox của HWR

4.2.3 Mô hình hóa hồi quy bằng Gaussian Process Regression (*GPR*)

Nội dung phần này đã được trình bày ở Mục 3.3.

4.2.4 Tối ưu hóa đa mục tiêu bằng thuật toán *NSGA-II*

a) Giới thiệu

Thuật toán Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (*NSGA-II*) được sử dụng. *NSGA-II* là một thuật toán tiến hóa đa mục tiêu nổi bật nhờ khả năng duy trì đa dạng nghiệm và hiệu quả tính toán cao.

b) Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu $F(x)$ bao gồm ba thành phần:

$$\text{Maximize } f_1(x) = MRR(x) \quad (4.5)$$

$$\text{Minimize } f_2(x) = Ra(x) \quad (4.6)$$

$$\text{Minimize } f_3(x) = HWR(x) \quad (4.7)$$

Trong đó, $x = [A, T_{on}, T_{off}, I_p, SV]$ là vector các biến thiết kế.

c) Cấu hình thuật toán *NSGA-II*

Trong nghiên cứu này, bài toán tối ưu đa mục tiêu đồng thời Ra – MRR – HWR được giải bằng thuật toán di truyền sắp xếp không thống trị II (*NSGA-II*) thông qua

hàm *gamultiobj* trong môi trường *MATLAB*. Các tham số chính được thiết lập:

- Phương pháp tối ưu: Bài toán tối ưu đa mục tiêu Ra–MRR–HWR được giải bằng thuật toán *NSGA-II* thông qua hàm *gamultiobj* trong môi trường *MATLAB*.
- Biến thiết kế: Bài toán bao gồm 5 biến công nghệ chính: A ; T_{on} ; T_{off} ; I_p và SV .
- Cấu hình quần thể và thế hệ: Kích thước quần thể và số thế hệ tối đa đều được lựa chọn là 200 nhằm đảm bảo độ đa dạng nghiệm và khả năng hội tụ ổn định của biên Pareto.
- Toán tử di truyền: Tỷ lệ lai ghép được thiết lập ở mức cao (0,8) để tăng cường khai thác các vùng nghiệm tiềm năng; toán tử đột biến *mutationadaptfeasible* được sử dụng để duy trì tính khả thi của nghiệm và cân bằng giữa khả năng khám phá và hội tụ.
- Tiêu chí dừng: Thuật toán dừng khi đạt số thế hệ tối đa hoặc khi mức cải thiện của biên Pareto nhỏ hơn ngưỡng sai số đặt trước ($\text{FunctionTolerance} = 10^{-6}$).

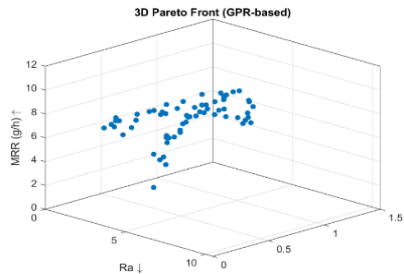
4.2.5 Các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM)

Phương pháp *AHP*, Phương pháp *TOPSIS*, Phương pháp *EAMR*, Phương pháp *EDAS*, Phương pháp Entropy xác định trọng số tiêu chí.

4.3 Kết quả tối ưu và phân tích tập nghiệm Pareto

4.3.1 Tập nghiệm Pareto trong không gian ba mục tiêu

Tập nghiệm *Pareto* trong không gian ba chiều (*MRR-Ra-HWR*) thể hiện trong Hình 4.4. Tồn tại của mối quan hệ xung đột giữa ba mục tiêu. Các nghiệm có *MRR* lớn thường đi kèm với *Ra* và *HWR* lớn hơn. Ngược lại, các nghiệm có *Ra* và *HWR* thấp thường chỉ đạt *MRR* ở mức trung bình hoặc thấp. Sự phân bố tương đối đồng đều các nghiệm trên Pareto front cho thấy thuật toán *NSGA-II* kết hợp với mô hình *GPR* có khả năng khám phá tốt không gian nghiệm, đồng thời tránh hiện tượng hội tụ cục bộ.



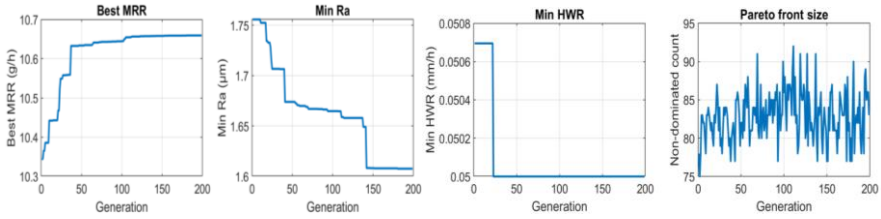
Hình 4.4 Tập nghiệm Pareto 3D giữa *MRR*, *Ra* và *HWR* thu được từ *NSGA-II*

4.3.2 Điều kiện dừng và hành vi hội tụ của thuật toán *NSGA-II*

Hình 4.5 trình bày sự thay đổi theo số thế hệ của bốn chỉ số đặc trưng, bao gồm giá trị *MRR* tốt nhất, giá trị *Ra* nhỏ nhất, giá trị *HWR* nhỏ nhất trong quần thể, và số lượng nghiệm không bị trội.

- Giá trị *MRR* tăng nhanh ở các thế hệ đầu, sau đó tăng chậm và ổn định, cho thấy *NSGA-II* khai thác hiệu quả và hội tụ tốt. Giá trị nhỏ nhất của *Ra* và *HWR* giảm mạnh ban đầu và sớm đạt trạng thái ổn định, phản ánh khả năng kiểm soát tốt các mục tiêu chất lượng.

Số lượng nghiệm không bị trội ổn định sau một số thế hệ, cho thấy cấu trúc tập nghiệm *Pareto* không còn thay đổi đáng kể. Thuật toán *NSGA-II* đạt trạng thái hội tụ ổn định trước khi kết thúc, đảm bảo độ tin cậy của tập nghiệm Pareto cho các phân tích tiếp theo.



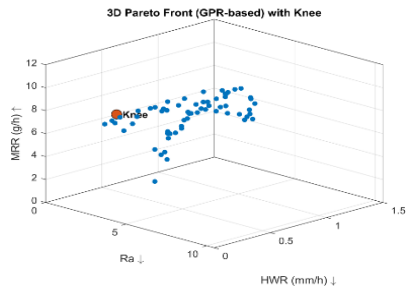
Hình 4.4 Đồ thị hội tụ của thuật toán NSGA-II

a. Giá trị MRR tốt nhất b. Giá trị Ra nhỏ nhất

c. Giá trị HWR nhỏ nhất d. Số nghiệm không bị trội theo số thế hệ.

4.3.3 Xác định và phân tích điểm knee trên Pareto front

Từ kết quả chương trình Matlab, điểm knee tương ứng: $A = 3,086132 \mu\text{m}$, $T_{on} = 15,798762 \mu\text{s}$, $T_{off} = 12,740683 \mu\text{s}$, $I_p = 8,233868 \text{ A}$ và $SV = 4,600083 \text{ V}$, cho các đầu ra $MRR = 8,567433 \text{ g/h}$, $Ra = 3,380038 \mu\text{m}$ và $HWR = 0,148105 \text{ mm/h}$. Điểm knee nằm ở vùng trung gian: MRR đạt mức cao trong khi Ra và HWR vẫn được duy trì ở mức tương đối thấp so với nhiều nghiệm khác có MRR lớn.



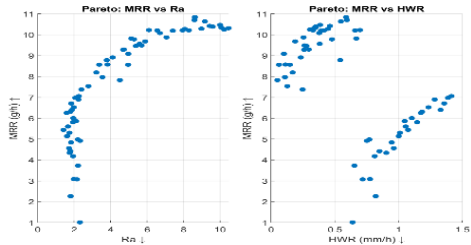
Hình 4.6 Pareto front 3D có đánh dấu điểm knee

Điểm knee được xác định trong Hình 4.6: là nghiệm đạt MRR cao trong khi Ra và HWR vẫn được kiểm soát tốt, phù hợp làm mốc tham chiếu cho bước ra quyết định tiếp theo bằng các phương pháp MCDM.

4.3.4 Phân tích quan hệ đánh đổi giữa các cặp mục tiêu

Các quan hệ đánh đổi giữa từng cặp mục tiêu được thể hiện trong Hình 4.7.

MRR–Ra: khi MRR tăng, Ra có xu hướng tăng theo, đặc biệt ở vùng MRR cao, cho thấy hiệu quả cận biên của việc tăng MRR bị giới hạn bởi sự suy giảm chất lượng bề mặt. **MRR–HWR:** mối quan hệ xung đột rõ rệt, phản ánh sự gia tăng mòn điện cực khi năng lượng phóng điện tăng. **Ra–HWR:** hai đại lượng này có xu hướng đồng biến, cho thấy điều kiện gia công khắc nghiệt ảnh hưởng đồng thời đến Ra và tuổi thọ điện cực.

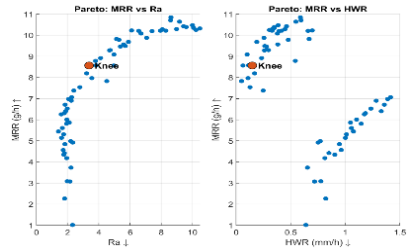


Hình 4.7 Các đồ thị Pareto hai chiều giữa các cặp mục tiêu:

a. MRR–Ra; b. MRR–HWR; c. Ra–HWR.

4.3.5 Phân tích Pareto theo điểm knee trên các mặt phẳng hai chiều

Đánh dấu điểm *knee* trên các đồ thị *Pareto* hai chiều được trình bày trong Hình 4.8 nhằm làm rõ hơn vai trò của nghiệm này trong không gian mục tiêu. Điểm *knee* nằm trong vùng trung gian của cả ba mục tiêu, nơi *MRR* đạt giá trị tương đối cao trong khi *Ra* và *HWR* vẫn được kiểm soát ở mức hợp lý. Điều này cũng cố vai trò của điểm *knee* như một nghiệm đại diện có ý nghĩa kỹ thuật và thực tiễn.



Hình 4.8 Các đồ thị *Pareto* hai chiều có đánh dấu điểm *knee*.

4.3.6 Phân tích tập nghiệm *Pareto* theo yêu cầu doanh nghiệp

Theo yêu cầu của doanh nghiệp, mục tiêu ưu tiên là tối đa hóa *MRR*, trong khi $Ra \leq 4 \mu\text{m}$ và $HWR \leq 0,6 \text{ mm/h}$ được xem là các ràng buộc công nghệ bắt buộc. Do đó, từ tập nghiệm *Pareto* ban đầu, một tập nghiệm con thỏa các ràng buộc này được xác định. Kết quả cho thấy tồn tại nhiều nghiệm *Pareto* đáp ứng đồng thời các yêu cầu về chất lượng bề mặt và mòn điện cực, đồng thời vẫn đạt *MRR* ở mức cao. Đây chính là cơ sở để áp dụng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (*AHP*, *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS*) trong các mục tiếp theo nhằm lựa chọn chế độ gia công tối ưu nhất cho ứng dụng thực tế.

4.3.7 Nhận xét chung

Thông qua các kết quả trình bày từ Hình 4.6 đến Hình 4.8, có thể khẳng định rằng thuật toán *NSGA-II* đã xây dựng thành công tập nghiệm *Pareto* chất lượng cao cho bài toán tối ưu đa mục tiêu của quá trình *EDM* có hỗ trợ rung động siêu âm. Việc phân tích tập nghiệm *Pareto* không chỉ làm rõ bản chất xung đột giữa *MRR*, *Ra* và *HWR* mà còn tạo nền tảng khoa học vững chắc cho bước ra quyết định đa tiêu chí ở các mục tiếp theo của chương.

4.4 Lựa chọn phương án tối ưu từ tập nghiệm *Pareto*

Để phục vụ triển khai trong thực tế sản xuất, cần lựa chọn một phương án tối ưu đại diện từ tập nghiệm *Pareto*. Do đó, một chiến lược ra quyết định hai bước được áp dụng: (i) xác định tập nghiệm khả thi theo các ràng buộc công nghệ của doanh nghiệp; và (ii) lựa chọn phương án tối ưu từ tập nghiệm khả thi bằng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (*MCDM*).

4.4.1 Xác định tập nghiệm khả thi

Theo yêu cầu của doanh nghiệp đảm bảo các điều kiện bắt buộc:

$$Ra \leq 4 \mu\text{m} \text{ và } HWR \leq 0,6 \text{ mm/h}$$

4.4.2 Lựa chọn phương án theo *AHP*

Kết quả tính toán *AHP* từ chương trình *Matlab*, phương án có giá trị điểm tổng hợp *AHP* lớn nhất được xác định là nghiệm tối ưu theo *AHP*. Tương ứng: $A = 3,079858 \mu\text{m}$, $Ton = 15,866091 \mu\text{s}$, $Toff = 12,925115 \mu\text{s}$, $I_p = 10,972303 \text{ A}$ và $SV = 4,681756 \text{ V}$, cho các giá trị đầu ra $MRR = 9,683182 \text{ g/h}$, $Ra = 5,898281 \mu\text{m}$ và $HWR = 0,189407 \text{ mm/h}$. Điểm tổng hợp *AHP* = 0,794196 là nghiệm được đánh giá cao nhất trong toàn bộ tập nghiệm *Pareto*, nhờ giá trị *MRR* vượt trội, so sánh với nghiệm

tại điểm knee trên *Pareto front*: *MRR* cao hơn đáng kể nhưng phải đánh đổi bằng sự suy giảm rõ rệt về chất lượng bề mặt. Trong nghiên cứu này, nghiệm tối ưu theo *AHP* được xem là nghiệm tham chiếu phản ánh xu hướng tối đa hóa năng suất, trong khi các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí khác (*TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS*).

4.2.3 Lựa chọn phương án theo *TOPSIS*

Kết quả tính toán chi tiết của phương pháp *TOPSIS*, bao gồm các giá trị chuẩn hóa k_{ij} , ma trận có trọng số l_{ij} , khoảng cách S_i^+ , S_i^- , chỉ số ưu tiên R_i và thứ hạng, (Bảng 4.1); Trial 55 đạt giá trị R_i lớn nhất (Rank = 1) và đồng thời thuộc tập nghiệm khả thi.

Phương án này tương ứng với bộ thông số công nghệ $A = 2,896749 \mu\text{m}$, $T_{on} = 15,473460 \mu\text{s}$, $T_{off} = 13,206010 \mu\text{s}$, $I_p = 7,022704 \text{ A}$ và $SV = 4,662458 \text{ V}$, cho các giá trị đầu ra $MRR = 7,538904 \text{ g/h}$, $Ra = 2,788294 \mu\text{m}$ và $HWR = 0,127529 \text{ mm/h}$. Điều này cho thấy phương án được lựa chọn theo *TOPSIS* không chỉ đạt thứ hạng cao về mặt toán học mà còn hoàn toàn đáp ứng yêu cầu công nghệ của doanh nghiệp.

Bảng 4.1 Kết quả tính toán và xếp hạng các nghiệm Pareto theo TOPSIS

Trial.	k_{ij}			l_{ij}			S_i^+	S_i^-	R_i	Rank
	Ra	EWR	MRR	Ra	EWR	MRR				
1	0,0316	0,1760	0,0811	0,0086	0,0840	0,0203	0,0826	0,0630	0,4329	58
2	0,1002	0,0082	0,1167	0,0273	0,0039	0,0292	0,0218	0,1154	0,8409	7
3	0,2271	0,0500	0,1528	0,0618	0,0239	0,0383	0,0569	0,0933	0,6211	29
4	0,0851	0,0186	0,1278	0,0232	0,0089	0,0320	0,0176	0,1129	0,8652	4
10	0,0516	0,1047	0,0152	0,0140	0,0500	0,0038	0,0591	0,0781	0,5690	37
11	0,0435	0,1807	0,0896	0,0119	0,0862	0,0224	0,0844	0,0599	0,4151	61
12	0,1646	0,0641	0,1520	0,0448	0,0306	0,0381	0,0451	0,0889	0,6637	22
29	0,1266	0,0430	0,1415	0,0345	0,0205	0,0354	0,0312	0,0997	0,7618	16
30	0,0790	0,0179	0,1188	0,0215	0,0085	0,0298	0,0174	0,1133	0,8667	3
31	0,0751	0,0243	0,1277	0,0204	0,0116	0,0320	0,0165	0,1115	0,8712	2
54	0,1792	0,0731	0,1533	0,0488	0,0349	0,0384	0,0508	0,0844	0,6243	26
55	0,0619	0,0209	0,1124	0,0169	0,0100	0,0282	0,0160	0,1134	0,8760	1
56	0,0716	0,0277	0,1222	0,0195	0,0132	0,0306	0,0174	0,1100	0,8633	5
68	0,0516	0,1047	0,0152	0,0140	0,0499	0,0038	0,0591	0,0781	0,5691	36
69	0,2132	0,0572	0,1549	0,0580	0,0273	0,0388	0,0547	0,0904	0,6231	28
70	0,1042	0,0426	0,1384	0,0284	0,0203	0,0347	0,0264	0,1016	0,7940	12

4.4.4 Lựa chọn phương án theo *EAMR*

Trial 55 tiếp tục đạt giá trị S_i lớn nhất (Rank = 1) (Bảng 4.2). Phương án này trùng hoàn toàn với phương án tối ưu được lựa chọn theo *TOPSIS*, cả về thông số đầu vào lẫn các giá trị đầu ra MRR , Ra và HWR .

Sự trùng khớp này cho thấy tính ổn định và nhất quán cao của phương án Trial 55 khi được đánh giá bằng các phương pháp *MCDM* khác nhau.

Bảng 4.2 Kết quả tính toán và xếp hạng các nghiệm Pareto theo phương pháp EAMR.

Trial.	nij			Vij			Gi-	Gi+	Si	Rank
	Ra	EWR	MRR	Ra	EWR	MRR				
1	0,1357	0,7597	0,5019	0,0369	0,3625	0,1258	0,3995	0,1258	0,3149	52
2	0,4310	0,0353	0,7218	0,1173	0,0169	0,1809	0,1342	0,1809	1,3475	6
3	0,9766	0,2159	0,9453	0,2659	0,1030	0,2369	0,3689	0,2369	0,6421	29
4	0,3661	0,0803	0,7906	0,0997	0,0383	0,1981	0,1380	0,1981	1,4358	3
10	0,2217	0,4520	0,0938	0,0604	0,2157	0,0235	0,2760	0,0235	0,0851	70
11	0,1873	0,7803	0,5539	0,0510	0,3723	0,1388	0,4233	0,1388	0,3279	45
12	0,7079	0,2768	0,9401	0,1927	0,1321	0,2356	0,3248	0,2356	0,7253	21
29	0,5446	0,1857	0,8751	0,1483	0,0886	0,2193	0,2369	0,2193	0,9258	16
30	0,3396	0,0771	0,7350	0,0925	0,0368	0,1842	0,1293	0,1842	1,4247	4
31	0,3229	0,1047	0,7900	0,0879	0,0500	0,1980	0,1379	0,1980	1,4360	2
54	0,7707	0,3157	0,9481	0,2098	0,1506	0,2376	0,3605	0,2376	0,6590	26
55	0,2663	0,0902	0,6952	0,0725	0,0430	0,1742	0,1155	0,1742	1,5078	1
56	0,3078	0,1197	0,7557	0,0838	0,0571	0,1893	0,1409	0,1893	1,3435	7
68	0,2218	0,4518	0,0938	0,0604	0,2156	0,0235	0,2760	0,0235	0,0852	69
69	0,9166	0,2470	0,9580	0,2496	0,1179	0,2401	0,3674	0,2401	0,6534	28
70	0,4482	0,1838	0,8561	0,1220	0,0877	0,2145	0,2097	0,2145	1,0230	13

4.4.5 Lựa chọn phương án theo EDAS

Bảng 4.3 cho thấy Trial 55 tiếp tục được xác định là phương án tối ưu với AS_i lớn nhất (Rank = 1). Phương án này không chỉ nằm trong tập nghiệm khả thi mà còn đạt vị trí thuận lợi so với giá trị trung bình của toàn bộ tập nghiệm Pareto, phản ánh tính cân bằng và độ ổn định cao của chế độ gia công được đề xuất.

Bảng 4.3 Kết quả tính toán và xếp hạng các nghiệm Pareto theo phương pháp EDAS.

Trial.	SPi'			NSPi	NSNi	ASi	Rank
	Ra	IWR	MRR				
1	0,1871	0,0000	0,0000	0,3863	0,3313	0,3588	58
2	0,0017	0,4388	0,0088	0,9276	1,0000	0,9638	6
3	0,0000	0,2425	0,0891	0,6849	0,4555	0,5702	26
4	0,0424	0,3900	0,0335	0,9621	1,0000	0,9810	4
10	0,1330	0,0000	0,0000	0,2747	0,6313	0,4530	43
11	0,1547	0,0000	0,0000	0,3195	0,3254	0,3224	61
12	0,0000	0,1764	0,0872	0,5445	0,7250	0,6347	23
29	0,0000	0,2754	0,0639	0,7006	0,8888	0,7947	16
30	0,0591	0,3933	0,0135	0,9622	1,0000	0,9811	3
31	0,0696	0,3634	0,0333	0,9629	1,0000	0,9814	2
54	0,0000	0,1341	0,0901	0,4630	0,6620	0,5625	29

Trial.	SPi'			NSPi	NSNi	ASi	Rank
	Ra	IWR	MRR				
55	0,1051	0,3792	0,0000	1,0000	0,9988	0,9994	1
56	0,0790	0,3470	0,0210	0,9232	1,0000	0,9616	7
68	0,1330	0,0000	0,0000	0,2746	0,6315	0,4531	42
69	0,0000	0,2088	0,0937	0,6246	0,5157	0,5701	28
70	0,0000	0,2775	0,0571	0,6908	0,9855	0,8382	13

Nhận xét tổng hợp:

Kết quả trình bày trong Bảng 4.1 - Bảng 4.3 cho thấy *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS* đều đồng thuận lựa chọn phương án 55 là phương án tối ưu trong tập nghiệm khả thi

4.4.6 Lựa chọn phương án theo tiêu chí “MRR lớn nhất trong tập nghiệm khả thi”

Phương án *MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi tương ứng với bộ thông số công nghệ $A = 3,068 \mu\text{m}$, $T_{on} = 15,613 \mu\text{s}$, $T_{off} = 9,831 \mu\text{s}$, $I_p = 8,333 \text{ A}$ và $SV = 4,689 \text{ V}$, cho các giá trị đầu ra $MRR = 8,786 \text{ g/h}$, $Ra = 3,794 \mu\text{m}$ và $HWR = 0,542 \text{ mm/h}$. Phương án này thỏa đầy đủ các ràng buộc công nghệ của doanh nghiệp, đạt năng suất gia công cao nhất trong số các nghiệm có thể chấp nhận về mặt kỹ thuật.

4.4.7 So sánh các phương án tối ưu và lựa chọn cuối cùng

Bảng 4.4 So sánh nghiệm knee và các phương án tối ưu được lựa chọn bởi *AHP* và các phương pháp *MCDM*.

Method	<i>A</i>	T_{on}	T_{off}	<i>IP</i>	<i>SV</i>	<i>MRR</i>	<i>Ra</i>	<i>HWR</i>	Khả thi
<i>knee</i>	3,086	15,799	12,741	8,234	4,600	8,567	3,380	0,148	✓
<i>AHP</i>	3,080	15,866	12,925	10,972	4,682	9,683	5,898	0,189	×
<i>TOPSIS</i>	2,897	15,473	13,206	7,023	4,662	7,539	2,788	0,128	✓
<i>EAMR</i>	2,897	15,473	13,206	7,023	4,662	7,539	2,788	0,128	✓
<i>EDAS</i>	2,897	15,473	13,206	7,023	4,662	7,539	2,788	0,128	✓
<i>MRR max</i>	3,068	15,613	9,831	8,333	4,689	8,786	3,794	0,542	✓

AHP phù hợp để tham chiếu xu hướng tối đa hóa *MRR* nhưng không đảm bảo tính khả thi; nghiệm knee là mốc Pareto quan trọng để hiểu cấu trúc đánh đổi của bài toán; *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS* cung cấp các phương án ổn định, an toàn về mặt công nghệ; trong khi phương án “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi” là lựa chọn phù hợp nhất cho triển khai thực tế, ưu tiên năng suất gia công trong giới hạn chất lượng cho phép.

Kết luận chương 4

- Bài toán tối ưu đa mục tiêu quá trình *UV-EDM* được giải quyết thông qua sự kết hợp giữa mô hình *GPR*, thuật toán *NSGA-II* và các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí. *NSGA-II* tạo ra tập nghiệm Pareto phản ánh đầy đủ mối quan hệ đánh đổi giữa *MRR*, *Ra* và *HWR*; phân tích Pareto front và nghiệm knee cung cấp cơ sở kỹ thuật cho quá trình lựa chọn phương án.

- *AHP* ưu tiên tối đa hóa năng suất nhưng có nguy cơ suy giảm chất lượng bề mặt, trong khi *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS* cho kết quả ổn định, thỏa mãn tốt các ràng buộc công nghệ. Đề xuất phương án “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi”, tối đa hóa *MRR* dưới các ràng buộc *Ra* và *HWR*, phản ánh sát yêu cầu sản xuất thực tế.

- Không tồn tại phương án tối ưu duy nhất; việc lựa chọn phụ thuộc vào mục

tiêu ứng dụng. Cách tiếp cận đề xuất chứng minh hiệu quả và có khả năng mở rộng cho các bài toán tối ưu quá trình gia công khác.

KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

- Luận án nghiên cứu có hệ thống quá trình *UV-EDM* gia công bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi bằng điện cực graphite HK2, dựa trên thiết kế thí nghiệm Box–Behnken với 5 thông số đầu vào và 3 chỉ tiêu đầu ra (*MRR*, *Ra*, *HWR*). Xây dựng và vận hành thành công hệ thống *UV-EDM* tích hợp rung siêu âm trên máy Sodick; dữ liệu thực nghiệm có độ tin cậy cao, đáp ứng yêu cầu mô hình hóa và tối ưu hóa.

- Phát triển mô hình dự đoán bằng hồi quy và đặc biệt là *GPR*; *GPR* cho độ chính xác cao, phù hợp với tính phi tuyến của quá trình và được sử dụng hiệu quả như mô hình thay thế cho tối ưu hóa.

- Giải các bài toán tối ưu *MRR*, *Ra* và *HWR* riêng rẽ, làm rõ giới hạn công nghệ và mối quan hệ đánh đổi giữa năng suất, chất lượng bề mặt và mòn điện cực. Áp dụng *NSGA-II* kết hợp *GPR* để giải bài toán tối ưu đồng thời *MRR–Ra–HWR*, thu được tập nghiệm Pareto phản ánh rõ cấu trúc đánh đổi giữa các mục tiêu.

- Áp dụng các phương pháp *MCDM* và đề xuất chiến lược “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi” dưới ràng buộc *Ra* và *HWR*; phương án này khuyến nghị cho triển khai thực tế khi ưu tiên năng suất. Đề xuất quy trình nghiên cứu hoàn chỉnh từ thực nghiệm đến tối ưu và ra quyết định, có khả năng mở rộng cho *UV-EDM* và quá trình gia công tiên tiến khác.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Áp dụng quy trình mô hình hóa–tối ưu cho các vật liệu khó gia công và điều kiện điện môi, điện cực khác để đánh giá tính khái quát của mô hình và chiến lược lựa chọn nghiệm.

Nghiên cứu ảnh hưởng của các phương thức truyền rung (qua điện cực, qua phôi hoặc đồng thời) đến hiệu quả gia công.

Kết hợp các mô hình nhiệt, điện, plasma và dòng chảy nhằm làm rõ cơ chế bóc tách vật liệu trong *UV-EDM*. Xây dựng phần mềm tương tác hỗ trợ lựa chọn thông số công nghệ theo các ưu tiên sản xuất khác nhau.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Dinh, V.-T.; Le, T.-Q.; Vu, D.-B.; Vu, N.-P.; **Mai, T.-L***: “*Ultrasonic EDM for External Cylindrical Surface Machining with GGraphite Electrodes: Horn Design and Hybrid NSGA-II–AHP Optimization of MRR and Ra.*” *Machines* 2025, 13, 675. <https://doi.org/10.3390/machines13080675>.
2. Thu-Quy Le; Van-Thanh Dinh; Ngoc-Pi Vu; **Tat-Loi Mai***: “*Analysis and Optimization of Electrode Wear Rate in EDM Using GGraphite Electrodes: A Statistical and GPR-Based Approach*”. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* (accepted, in press).
3. Huu Danh Tran; Hoang Anh Le; Cong Danh Nguyen; Van Thanh; **Tat Loi Mai**; Manh Cuong Nguyen*: “*A Decision-Supporting Multi-Objective Approach for Vibration-Assisted EDM of HARDOX 500 Using NSGA-II and AHP*”. *Engineering, Technology & Applied Science Research* (accepted, in press).
4. Tran Huu Danh, **Mai Tat Loi**², Vu Ngoc Pi and Nguyen Manh Cuong*: “*Multi-objective optimization and decision-making in ultrasonic vibration-assisted EDM of HARDOX 500 using NSGA-II coupled with saw, MARCOS, and TOPSIS*”. *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 335, tháng 11/2025.
5. Trần Hữu Danh, Nguyễn Công Danh, **Mai Tất Lợi**, and Nguyễn Mạnh Cường*: “*Simultaneous optimization of material removal Rate and surface roughness in ultrasonic vibration-assisted EDM of HARDOX 500 using NSGA-II and MABAC*”. *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 333, tháng 10/2025.