

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 CÓ TRỢ GIÚP
CỦA RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM
SỬ DỤNG ĐIỆN CỰC GRAPHITE**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ

MAI TẮT LỢI

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ

2026

HÀ NỘI - 2026

BỘ CÔNG THƯƠNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

NARIME

MAI TẤT LỢI

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số: 9520103

**Xác nhận
của Viện Nghiên cứu Cơ khí
Giám đốc trung tâm đào tạo**

Người hướng dẫn 1
(Ký, ghi rõ họ tên)

Người hướng dẫn 2
(Ký, ghi rõ họ tên)

PGS. TS. Lê Thu Quý

GS.TS. Vũ Ngọc Pi

PGS.TS. Lê Thu Quý

HÀ NỘI - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: "Nghiên cứu gia công bề mặt trụ ngoài khi xung tia lửa điện có trợ giúp của rung động siêu âm sử dụng điện cực graphite" là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn khoa học là GS.TS. Vũ Ngọc Pi và PGS.TS. Lê Thu Quý. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Viện Nghiên cứu Cơ khí.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

Tác giả luận án

Mai Tất Lợi

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới GS.TS. Vũ Ngọc Pi và PGS.TS. Lê Thu Quý đã tận tình hướng dẫn, định hướng khoa học, hỗ trợ tổ chức thực nghiệm và góp ý quý báu trong suốt quá trình nghiên cứu và hoàn thiện Luận án.

Tác giả trân trọng cảm ơn tập thể thành viên đề tài cấp Bộ “Nghiên cứu gia công xung điện bề mặt trụ ngoài dùng điện cực graphite với sự trợ giúp của rung động siêu âm” do Bộ Giáo dục và Đào tạo quản lý, năm 2023, do GS.TS. Vũ Ngọc Pi làm chủ nhiệm. Tác giả đồng thời là thành viên chính của đề tài và đã nhận được sự hỗ trợ, chia sẻ kinh nghiệm, cung cấp kết quả nghiên cứu cũng như tạo điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Doanh nghiệp tư nhân Cơ khí chính xác Thái Hà đã hỗ trợ trang thiết bị và phối hợp chặt chẽ trong quá trình thực nghiệm.

Tác giả cũng xin gửi lời cảm ơn tới các Thầy, Cô giáo và các đồng nghiệp đã đồng viên, giúp đỡ và tạo điều kiện thuận lợi trong suốt thời gian học tập và nghiên cứu.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới gia đình, những người luôn đồng hành, đồng viên và là điểm tựa vững chắc để tác giả hoàn thành Luận án này.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

Tác giả luận án

Mai Tất Lợi

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT	vi
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU	vii
DANH MỤC BẢNG	viii
MỞ ĐẦU	1
1. Tính cấp thiết.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu.....	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	3
4. Phương pháp nghiên cứu.....	3
5. Nội dung nghiên cứu	4
6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....	4
7. Những đóng góp mới.....	4
8. Cấu trúc của luận án	5
Chương 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN.....	6
1.1 Tổng quan về gia công bằng tia lửa điện (<i>EDM</i>).....	6
1.1.1 Lịch sử phát triển	6
1.1.2 Nguyên lý của gia công <i>EDM</i>	7
1.1.3 Các thông số cơ bản của quá trình <i>EDM</i>	9
1.1.4 Các chỉ tiêu đầu ra đánh giá quá trình <i>EDM</i>	12
1.2 Tổng quan về gia công xung điện có trợ giúp rung động siêu âm	16
1.2.1 Sự cần thiết của rung động siêu âm trong gia công <i>EDM</i>	16
1.2.2 Nguyên lý tác động của rung động siêu âm trong <i>EDM</i>	18
1.2.3 Các hình thức rung động siêu âm sử dụng trong gia công <i>EDM</i>	20
1.3 Tình hình nghiên cứu về <i>UV-EDM</i> trên thế giới.....	25
1.3.1 Giai đoạn khởi đầu.....	25
1.3.2 Tăng cường hiệu năng và chất lượng gia công.....	25
1.3.3 Cơ chế quá trình và mô phỏng.....	26
1.3.4 Phát triển các cấu hình và ứng dụng mới	30
1.4 Tình hình nghiên cứu về <i>EDM</i> trợ giúp siêu âm ở Việt Nam.....	30
1.5 Tổng quan xu hướng	33
Kết luận Chương 1	35
Chương 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM.....	36
2.1 Phương pháp thiết kế thí nghiệm <i>Box-Behnken</i>	36
2.2 Phương pháp tối ưu hoá đơn mục tiêu và đa mục tiêu.....	36

2.3	Thiết kế hệ thống thí nghiệm	37
2.3.1	Vật liệu gia công 90CrSi	37
2.3.2	Vật liệu điện cực graphite HK2	40
2.4	Thiết kế <i>Horn</i> siêu âm.....	42
2.4.1	Cơ sở của thiết kế <i>horn</i>	45
2.4.2	Tính toán lý thuyết chiều dài đầu <i>horn</i>	47
2.4.3	Xác định chiều dài đầu <i>horn</i> bằng thực nghiệm.....	49
2.5	Thiết kế thí nghiệm và thu thập dữ liệu	51
2.5.1	Thiết lập hệ thống thí nghiệm.....	51
2.5.2	Thiết bị đo lường	52
2.5.3	Tiến hành thí nghiệm và thu thập dữ liệu.....	54
	Kết luận Chương 2.....	57
	Chương 3. TỐI ƯU HOÁ ĐƠN MỤC TIÊU Ra , MRR , HWR	59
3.1	Mô hình hóa quá trình bằng phương pháp RSM và GPR	59
3.1.1	Cơ sở lý thuyết của RSM	59
3.1.2	Phân tích phương sai ($ANOVA$) và độ tin cậy mô hình	60
3.2	Mô hình hóa ba hàm mục tiêu bằng RSM	66
3.2.1	Mô hình độ nhám bề mặt (Ra).....	66
3.2.2	Mô hình tốc độ bóc tách vật liệu (MRR)	67
3.2.3	Mô hình tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR)	69
3.3	Cải thiện mô hình dự đoán bằng $Gaussian Process Regression$ (GPR).....	70
3.3.1	Cơ sở lý thuyết.....	70
3.3.2	Huấn luyện mô hình GPR và lựa chọn hàm kernel tối ưu.....	70
3.3.3	Đánh giá độ chính xác mô hình	72
3.3.4	Tối ưu hóa đơn mục tiêu bằng mô hình GPR	74
3.3.5	Kiểm chứng thực nghiệm.	76
3.4	Phân tích ảnh hưởng các yếu tố đầu vào.....	76
3.4.1	Cơ sở và phương pháp phân tích	76
3.4.2	Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến Ra	77
3.4.3	Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến MRR	85
3.4.4	Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến HWR	93
3.5	Tối ưu hóa đơn mục tiêu tốc độ bóc tách vật liệu (MRR).....	103
3.5.1	Xác định bộ thông số tối ưu từ mô hình RSM	103
3.5.2	Kiểm chứng thực nghiệm	103
	Kết luận Chương 3.....	103
	Chương 4. TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU	105

4.1 Giới thiệu.....	105
4.2 Phương pháp nghiên cứu.....	107
4.2.1 Thiết kế thí nghiệm và thu thập dữ liệu.....	107
4.2.2 Biến đổi dữ liệu đầu ra bằng <i>Box-Cox</i>	107
4.2.3 Mô hình hóa hồi quy bằng <i>Gaussian Process Regression (GPR)</i>	108
4.2.4 Tối ưu hóa đa mục tiêu bằng thuật toán <i>NSGA-II</i>	109
4.2.5 Các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (<i>MCDM</i>).....	110
4.3 Kết quả tối ưu và phân tích tập nghiệm <i>Pareto</i>	116
4.3.1 Tập nghiệm <i>Pareto</i> trong không gian ba mục tiêu.....	117
4.3.2 Điều kiện dừng và hành vi hội tụ của thuật toán <i>NSGA-II</i>	117
4.3.3 Xác định và phân tích điểm <i>knee</i> trên <i>Pareto front</i>	118
4.3.4 Phân tích quan hệ đánh đổi giữa các cặp mục tiêu.....	120
4.3.5 Phân tích <i>Pareto</i> theo điểm <i>knee</i> trên các mặt phẳng hai chiều.....	120
4.3.6 Phân tích tập nghiệm <i>Pareto</i> theo yêu cầu doanh nghiệp.....	121
4.3.7 Nhận xét chung.....	121
4.4 Lựa chọn phương án tối ưu từ tập <i>Pareto</i>	121
4.4.1 Xác định tập nghiệm khả thi.....	122
4.4.2 Lựa chọn phương án theo <i>AHP</i>	122
4.4.3 Lựa chọn phương án theo <i>TOPSIS</i>	123
4.4.4 Lựa chọn phương án theo <i>EAMR</i>	124
4.4.5 Lựa chọn phương án theo <i>EDAS</i>	125
4.4.6 Lựa chọn phương án theo tiêu chí “ <i>MRR</i> lớn nhất trong tập nghiệm khả thi”.....	126
4.4.7 So sánh các phương án tối ưu và lựa chọn cuối cùng.....	127
Kết luận Chương 4.....	128
KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO.....	130
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	132
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	133

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Cụm từ viết tắt tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
<i>EDM</i> - Electrical discharge machining	Gia công bằng tia lửa điện
<i>UV-EDM</i> - Ultrasonic vibration-assisted electrical discharge machining	Gia công xung tia lửa điện có trợ giúp của rung siêu âm
<i>PMEDM</i> - Powder mixed electrical discharge machining	Gia công bằng tia lửa điện có trộn bột vào dung dịch điện môi
<i>MRR</i> - Material removal rate	Năng suất bóc tách vật liệu
<i>EWR</i> - Electrical wear rate	Tốc độ mòn điện cực
<i>UVPEDM</i> - Ultrasonic vibration pulse electro-discharge machining	Gia công tia lửa điện tích hợp rung siêu âm
<i>UVAM</i> - Ultrasonic vibration-assisted machining	Gia công hỗ trợ rung siêu âm
<i>RSM</i> - Response Surface Methodology	Mô hình bề mặt đáp ứng
<i>NSGA-II</i> - Nondominated Sorting Genetic Algorithm II	Thuật toán di truyền sắp xếp không thống trị II
<i>GPR</i> - Gaussian process regression	Hồi quy quy trình <i>Gauss</i>
<i>BBD</i> - Box–Behnken Design	Thiết kế <i>Box-Behnken</i>
<i>AHP</i> - Analytic Hierarchy Process	Quá trình phân tích phân cấp
<i>MCDM</i> - Multi-criteria decision making method	Phương pháp ra quyết định đa tiêu chí

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Ý nghĩa tiếng Việt	Đơn vị
A	Biên độ rung siêu âm	μm
T_{on}	Thời gian phóng điện	μs
T_{off}	Thời gian ngắt	μs
I_p	Dòng điện xung	A
SV	Điện áp xung	V
E	Mô đun đàn hồi	Pa
ρ	Khối lượng riêng	Kg/m^3
c	Vận tốc truyền sóng	m/s
λ	Chiều dài bước sóng	m
f	Tần số rung	Hz

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1 Các dạng rung động siêu âm trong EDM và tác dụng chính	21
Bảng 2.1 Thành phần hóa học của Thép 90CrSi (% khối lượng)	37
Bảng 2.2 Chế độ nhiệt luyện 90CrSi.....	38
Bảng 2.3 Đặc tính của graphite và đồng	40
Bảng 2.4 Thông số kỹ thuật Graphite HK	41
Bảng 2.5 Biên độ dao động của <i>horn</i> với $b = 61 \div 64$ mm (bước = 1 mm).....	50
Bảng 2.6 Chiều dài <i>horn</i> (L) và biên độ dao động (A) thu được nhờ thay đổi b	51
Bảng 2.7 Thông số đầu vào.....	54
Bảng 2.8 Kế hoạch và kết quả thí nghiệm	56
Bảng 3.1 Hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình Ra (μm)	61
Bảng 3.2 Hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình MRR (g/h).....	63
Bảng 3.3 Hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình HWR (mm/h).....	65
Bảng 3.4 Tổng hợp ảnh hưởng các thông số đầu vào đến ba đầu ra Ra , MRR , HWR	102
Bảng 4.1 Kết quả tính toán và xếp hạng các nghiệm <i>Pareto</i> theo phương pháp <i>TOPSIS</i>	123
Bảng 4.2 Kết quả tính toán và xếp hạng các nghiệm <i>Pareto</i> theo phương pháp <i>EAMR</i>	124
Bảng 4.3 Kết quả tính toán và xếp hạng các nghiệm <i>Pareto</i> theo phương pháp <i>EDAS</i>	125
Bảng 4.4 So sánh nghiệm knee và các phương án tối ưu được lựa chọn bởi <i>AHP</i> và các phương pháp <i>MCDM</i>	127

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1 Sơ đồ gia công xung điện [29]	7
Hình 1.2 Dạng sóng của dòng điện và điện áp xung [29]	10
Hình 1.3 Ảnh hưởng của vật liệu gia công đến MRR và Ra [2]	13
Hình 1.4 Ảnh hưởng của vật liệu điện cực đến độ mòn điện cực [3]	13
Hình 1.5 Cấu trúc lớp bề mặt sau EDM [2]	14
Hình 1.6 Vết nứt tế vi trên bề mặt gia công EDM [4].....	15
Hình 1.7 Sơ đồ hệ thống máy EDM có tích hợp bộ rung động siêu âm [37].....	19
Hình 1.8 Ảnh hưởng của thời gian phát xung T_{on} đến MRR [1]	22
Hình 1.9 Quan hệ giữa tốc độ tiến trung bình và tốc độ tiến đặt trước [52].....	23
Hình 1.10 Quá trình chuyển động của phoi $UV-EDM$ trong gia công lỗ [37].....	26
Hình 1.11 Ảnh hưởng của rung động đến MRR [78].....	32
Hình 1.12 Chày dập thuốc viên định hình	34
Hình 2.1 Chi tiết gia công 90CrSi	39
Hình 2.2 Dự báo mức sử dụng graphite trên thị trường thế giới	40
Hình 2.3 Điện cực Graphite HK2	41
Hình 2.4 Thiết kế đầu rung siêu âm	46
Hình 2.5 Dạng dao động dọc của đầu <i>horn</i> hai bậc	48
Hình 2.6 <i>Horn</i> - Đầu rung siêu âm.....	48
Hình 2.7 Setup đo biên độ dao động.....	49
Hình 2.8 Quan hệ giữa tổng chiều dài đầu <i>horn</i> L và biên độ dao động A	50
Hình 2.9 Quan hệ giữa chiều dài <i>horn</i> (L) và biên độ dao động (A).....	51
Hình 2.10 Setup thí nghiệm $UV-EDM$	52
Hình 2.11 Đo độ nhám bằng thiết bị Mitutoyo SV3100	53
Hình 2.12 Đo mòn điện cực dùng kính hiển vi kỹ thuật số PS-530G.....	53
Hình 2.13 Đồ gá điện cực Graphite.	55
Hình 3.1 Ảnh chụp màn hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho Ra thu được từ phần mềm <i>MATLAB</i>	61
Hình 3.2 Ảnh chụp màn hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho MRR thu được từ phần mềm <i>MATLAB</i>	63
Hình 3.3 Ảnh chụp màn hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho HWR thu được từ phần mềm <i>MATLAB</i>	64
Hình 3.4 Quan hệ giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán Ra	67
Hình 3.5 Phân bố phần dư theo giá trị dự đoán của Ra	67
Hình 3.6 Quan hệ giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán MRR	68
Hình 3.7 Phân bố phần dư theo giá trị dự đoán của MRR	68

Hình 3.8 Quan hệ giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán <i>HWR</i>	69
Hình 3.9 Phân bố phần dư theo giá trị dự đoán của <i>HWR</i>	69
Hình 3.10 So sánh các cấu hình mô hình <i>GPR</i> cho <i>Ra</i>	71
Hình 3.11 So sánh các cấu hình mô hình <i>GPR</i> cho <i>MRR</i>	71
Hình 3.12 So sánh các cấu hình mô hình <i>GPR</i> cho <i>HWR</i>	72
Hình 3.13 Mô hình <i>GPR</i> cho <i>MRR</i>	72
Hình 3.14 Mô hình <i>GPR</i> cho <i>Ra</i>	73
Hình 3.15 Mô hình <i>GPR</i> cho <i>HWR</i>	74
Hình 3.16 Kết quả tối ưu hóa đơn mục tiêu <i>MRR</i> dựa trên mô hình <i>GPR</i>	74
Hình 3.17 Kết quả tối ưu hóa đơn mục tiêu <i>Ra</i> dựa trên mô hình <i>GPR</i>	75
Hình 3.18 Kết quả tối ưu hóa đơn mục tiêu <i>HWR</i> dựa trên mô hình <i>GPR</i>	75
Hình 3.19 Biểu đồ đường đồng mức kết hợp của <i>Ra</i>	78
Hình 3.20 Biểu đồ ảnh hưởng chính (<i>Main Effect Plots</i>) của các yếu tố đến <i>Ra</i>	82
Hình 3.21 Biểu đồ cột hiệu ứng chính đến <i>Ra</i>	84
Hình 3.22 Biểu đồ đường đồng mức kết hợp của <i>MRR</i>	86
Hình 3.23 Biểu đồ ảnh hưởng chính (<i>Main Effect Plots</i>) của các yếu tố đến <i>MRR</i> ..	90
Hình 3.24 Biểu đồ cột hiệu ứng chính đến <i>MRR</i>	93
Hình 3.25 Biểu đồ đường đồng mức kết hợp của <i>HWR</i>	95
Hình 3.26 Biểu đồ hiệu ứng chính (<i>Main Effect Plots</i>) của các yếu tố đến <i>HWR</i>	99
Hình 3.27 Biểu đồ cột hiệu ứng chính đến <i>HWR</i>	101
Hình 4.1 Phân phối gốc và sau biến đổi <i>Box-Cox</i> của <i>MRR</i>	108
Hình 4.2 Phân phối gốc và sau biến đổi <i>Box-Cox</i> của <i>Ra</i>	108
Hình 4.3 Phân phối gốc và sau biến đổi <i>Box-Cox</i> của <i>HWR</i>	108
Hình 4.4 Tập nghiệm <i>Pareto 3D</i> giữa <i>MRR</i> , <i>Ra</i> và <i>HWR</i> thu được từ <i>NSGA-II</i>	117
Hình 4.5 Đồ thị hội tụ của thuật toán <i>NSGA-II</i>	118
Hình 4.6 <i>Pareto front 3D</i> có đánh dấu điểm <i>knee</i>	119
Hình 4.7 Các đồ thị <i>Pareto</i> hai chiều giữa các cặp mục tiêu:.....	120
Hình 4.8 Các đồ thị <i>Pareto</i> hai chiều có đánh dấu điểm <i>knee</i>	121

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Gia công xung điện (còn gọi là gia công bằng tia lửa điện - viết tắt tiếng Anh là *EDM*) là phương pháp phổ biến nhất trong các phương pháp gia công không truyền thống. Sở dĩ như vậy là vì phương pháp này có nhiều ưu điểm như có thể gia công kim loại và hợp kim sau nhiệt luyện; lực cắt và rung, ồn khi gia công nhỏ; phương pháp này rất thích hợp để gia công các chi tiết có hình dáng phức tạp, có dạng hốc như các lòng khuôn dập, khuôn đúc vv... Tuy nhiên, gia công xung điện cũng có một số nhược điểm như năng suất bóc tách thấp, điện cực mòn khá nhanh và chất lượng bề mặt gia công không cao.

Cho đến nay đã có nhiều nghiên cứu về quá trình *EDM*. Việc xác định các thông số tối ưu của quá trình *EDM* đã được thực hiện với các hàm mục tiêu khác nhau. Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số đầu vào của quá trình *EDM* đến tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*), tốc độ mòn điện cực (*EWR*) và độ nhám bề mặt (*Ra*) đã được nêu trong [1, 2]. Trong [3, 4] đã khảo sát ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến kết quả *MRR*, *EWR* và *Ra* khi gia công các vật liệu AISI 304, AISI 302B, 316L và 17-4 PH và thép công cụ AISI D6. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của các thông số quá trình *EDM* đến chất lượng bề mặt gia công cũng đã được khảo sát [5, 6]. Thêm vào đó, ảnh hưởng của cường độ dòng điện, điện áp khi xung, chu trình xung, thời gian xung vv... đến độ nhám bề mặt sau khi xung cũng được giới thiệu trong [6]. Độ mòn của điện cực khi xung cũng được các nhà nghiên cứu quan tâm nhiều. Ảnh hưởng của các thông số *EDM* đến độ mòn của điện cực đã được khảo sát trong [7]. Các thông số đầu vào tối ưu nhằm đạt độ mòn điện cực là nhỏ nhất cũng được đề xuất trong [4]. Ảnh hưởng của vật liệu điện cực đến chất lượng bề mặt gia công và độ mòn của chúng cũng được đề cập đến trong [7]. Bên cạnh đó, các loại vật liệu gia công khác nhau đã được khảo sát như Inconel 718 [6], thép AISI D6 [4], Ti-6Al-4V [8], composite kim loại Al 7075- B₄C [9] vv...

Để hạn chế các nhược điểm đã nêu ở trên của gia công *EDM* và nâng cao hiệu quả của quá trình này, một số giải pháp đã được đưa ra như gia công với chế độ xung tối ưu [10]; điều khiển thích nghi chuyển động của điện cực [11]; gia công với dung dịch điện môi có trộn bột [12, 13]; hoặc gia công với trợ giúp rung động [14].

EDM với trợ giúp của rung động đã nâng cao đáng kể hiệu quả của quá trình xung. Sở dĩ như vậy là vì rung động đã tạo ra các bong bóng tạo bọt vào chất lỏng điện môi tại vùng khe hở tia lửa, tạo ra các tia lửa siêu nhỏ, hỗ trợ loại bỏ các mảnh vụn ra khỏi khu vực gia công một cách hiệu quả. Thêm vào đó, việc loại bỏ các mảnh

vụn tức thời và liên tục tạo điều kiện thuận lợi để lưu thông điện môi mới vào khe hở tia lửa đã làm tần số phóng điện tăng lên do đó làm tăng thêm *MRR* [15].

Gia công xung điện với trợ giúp của rung động có thể thực hiện với rung động tần số thấp [14] hoặc rung động tần số cao [16]. Sự trợ giúp rung động nhờ đầu rung được gắn với điện cực [17] hoặc gắn với chi tiết gia công [18], thậm chí rung động có thể truyền qua môi trường chất điện môi [18]. Năng suất bóc tách khi xung với rung động siêu âm có thể tăng hơn 3 lần so với xung không hỗ trợ rung động [16] và thời gian xung có thể giảm 58% [19]. Nghiên cứu trong [20] báo cáo xung với rung động tần số thấp có thể làm *MRR* tăng đến 64,49%. Quá trình khoan lỗ siêu nhỏ (*micro EDM drilling*) với sự trợ giúp của rung động giúp tăng chiều sâu khoan tới 75% [21]. Tuy nhiên, gia công *EDM* với rung động siêu âm có thể làm tăng nhẹ độ nhám bề mặt so với quá trình không trợ giúp rung động [22].

Trong gia công xung điện, thông thường dụng cụ gia công là điện cực âm (catod) và chi tiết gia công là điện cực dương (anod). Điện cực trong gia công xung điện có thể làm bằng các loại vật liệu khác nhau nhưng phổ biến nhất là đồng hoặc graphite. Các điện cực thường được tạo hình để tạo ra chi tiết có hình dạng ngược với nó như các lòng khuôn ép nhựa, khuôn dập hay rèn. Tuy nhiên, trên thực tế có nhiều chi tiết có dạng hình trụ định hình như các chày dập viên định hình, chày đột lỗ định hình trên thép tấm vv... Để gia công *EDM* các chi tiết này, các điện cực phải có dạng lỗ trụ định hình. Gần đây đã có một số nghiên cứu về gia công xung điện [23, 24] và gia công xung điện có trộn bột [23-27] các bề mặt trụ ngoài định hình. Mặc dù vậy, cho đến nay, các công trình nghiên cứu về gia công *EDM* bề mặt trụ ngoài có sự hỗ trợ của rung động siêu âm khi sử dụng điện cực graphite vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, việc gia công tinh với điện cực Graphite HK2 đặt ra không ít thách thức, chủ yếu do đặc tính giòn, dễ vỡ của vật liệu này trong quá trình gá đặt và vận hành, đòi hỏi việc thiết lập chế độ *EDM* phải thật sự phù hợp và cẩn trọng.

Chính vì vậy “Nghiên cứu gia công bề mặt trụ ngoài khi xung tia lửa điện có trợ giúp của rung động siêu âm sử dụng điện cực graphite” là nghiên cứu có tính cấp thiết.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chung:

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.

Các mục tiêu cụ thể

- Thiết kế chế tạo thành công hệ thống *EDM* có trợ giúp của rung động siêu

âm, kết nối các thiết bị đo phù hợp với điều kiện trong nước nhằm phục vụ các nghiên cứu thực nghiệm.

- Đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ EDM (I_p , T_{on} , T_{off} , UV) và thông số rung động (20000Hz, A) trên vật liệu 90CrSi dựa trên 03 chỉ tiêu quan trọng: Tốc độ bóc tách vật liệu (MRR); Độ nhám bề mặt Ra ; và tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR).

- Xây dựng mô hình toán học RSM , GPR mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và các chỉ tiêu đầu ra.

- Tìm ra các bộ thông số gia công xung điện tối ưu nhằm đạt được các mục tiêu tăng năng suất bóc tách vật liệu, đảm bảo độ nhám bề mặt và giảm lượng mòn điện cực.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng 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 đã qua tôi, đường kính $\varnothing 14 \pm 0,01$ mm; Sử dụng điện cực graphite HK2 có đường kính $\varnothing 12 \pm 0,01$ mm. Nghiên cứu được thực hiện trong phòng thí nghiệm, hệ thống gia công xung điện có trợ giúp của rung động siêu âm được thiết kế, chế tạo và vận hành dựa trên các điều kiện, khả năng đáp ứng hiện có.

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.

- Tiếp cận: Kế thừa và phát triển từ kết quả nghiên cứu đã có.
- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết về gia công xung điện và xung với trợ giúp rung động; lý thuyết quy hoạch thực nghiệm.
 - Thực nghiệm, bao gồm các bước:
 - + Xây dựng hệ thống thực nghiệm và kế hoạch thực nghiệm *Box - Behnken*.
 - + Thiết kế và chế tạo đầu *Horn* siêu âm.
 - + Tiến hành thực nghiệm.
 - Xử lý kết quả thực nghiệm, bao gồm các bước:
 - + Xây dựng hàm đa thức bậc 2 mô tả mối quan hệ giữa các thông số đầu vào của quá trình xung với trợ giúp rung động siêu âm và các kết quả đầu ra khi thực nghiệm.
 - + Phân tích, đánh giá kết quả thực nghiệm, xác định các thông số tối ưu của quá trình xung và của đầu rung.
 - + Tối ưu hoá đơn mục tiêu Ra , MRR và HWR .

+ Tối ưu hoá đa mục tiêu nhằm MRR lớn nhất và Ra nhỏ nhất; MRR lớn nhất và HWR nhỏ nhất.

5. Nội dung nghiên cứu

- Nghiên cứu tổng quan về gia công xung điện và gia công xung điện có sự trợ giúp của rung động.

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết của quá trình xung điện và xung điện có trợ giúp của rung động.

- Nghiên cứu lựa chọn đầu rung cho quá trình xung điện.

- Thực nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số cơ bản của quá trình EDM có trợ giúp rung động siêu âm như cường độ dòng điện, điện áp phóng điện, thời gian phát xung, thời gian ngừng phát xung, thông số của đầu rung đến năng suất và chất lượng gia công và mòn điện cực khi xung tia lửa điện bề mặt trụ ngoài vật liệu 90CrSi sử dụng điện cực graphite.

- Tối ưu hóa các thông số quá trình xung có trợ giúp của rung động siêu âm để nâng cao hiệu quả quá trình gia công (tăng năng suất bóc tách, giảm mài mòn điện cực...).

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học của đề tài

- Đề tài đã đưa rung động siêu âm vào quá trình xung bề mặt trụ ngoài vật liệu 90CrSi qua môi trường sử dụng điện cực graphite. Qua đó, 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 để nâng cao hiệu quả quá trình xung.

- Đề tài sẽ 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 của đề tài

- 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.

7. Những đóng góp mới

- 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.
- Đề tài đã đề xuất và giải quyết bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu và đa mục tiêu các chỉ tiêu đầu ra quan trọng, bao gồm năng suất bóc tách vật liệu, độ nhám bề mặt và tốc độ mòn điện cực, góp phần nâng cao hiệu quả và chất lượng của quá trình gia công trong sản xuất hiện đại.

Dựa trên nền tảng lý luận chặt chẽ, việc xác định rõ khoảng trống nghiên cứu và định hướng ứng dụng thực tiễn cụ thể, đề tài hứa hẹn mang lại những đóng góp quan trọng cho sự phát triển công nghệ *UV-EDM* trong điều kiện Việt Nam, đồng thời mở ra các hướng nghiên cứu và ứng dụng mới trong lĩnh vực gia công tiên tiến.

8. Cấu trúc của luận án

Chương 1. Tổng quan về gia công xung điện

Trong chương này, các khái niệm cơ bản và nguyên tắc bổ sung rung động siêu âm trợ giúp gia công xung điện được giới thiệu. Các kết quả nghiên cứu gần đây trong lĩnh vực gia công xung điện có trợ giúp rung động cho thấy khả năng nâng cao hiệu suất gia công cũng như cải thiện chất lượng bề mặt. Qua đó, nêu bật được tính cấp thiết và khẳng định các đóng góp mới của đề tài.

Chương 2: Phương pháp nghiên cứu và hệ thống thí nghiệm

Thiết lập hệ thống thí nghiệm theo phương pháp *Box-Behnken*. Trình bày bài toán thiết kế, chế tạo *Horn* khuếch đại biên độ và hệ thống thiết bị thí nghiệm gia công mặt trụ ngoài bằng *EDM* với điều kiện trong nước. Tiến hành thực hiện thực nghiệm và thu thập dữ liệu.

Chương 3. Tối ưu hóa đơn mục tiêu Ra , MRR , HWR

Tối ưu hoá đơn mục tiêu gia công xung điện bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi sử dụng điện cực graphite: giảm thiểu độ nhám bề mặt (Ra), tốc độ mòn điện cực (HWR) và tối đa hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR).

Chương 4. Tối ưu hóa đa mục tiêu

Mô hình hoá hồi quy bằng *GPR* và tối ưu hoá đa mục tiêu bằng thuật toán *NSGA-II* tối ưu hoá đa mục tiêu nhằm MRR lớn nhất và Ra nhỏ nhất; MRR lớn nhất và HWR nhỏ nhất.

Cuối cùng là phần kết luận và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.

Chương 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

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 (Electric Discharge Machining - *EDM*) có nguồn gốc từ phát hiện vào năm 1770 khi nhà khoa học người Anh Joseph Priestley nhận thấy hiện tượng ăn mòn vật liệu do phóng tia lửa điện [28]. Tuy nhiên, phải đến thời kỳ Chiến tranh Thế giới II, phương pháp *EDM* mới được phát triển thành kỹ thuật gia công có kiểm soát. Năm 1943, hai vợ chồng nhà khoa học Liên Xô là Boris Lazarenko và Natalya Lazarenko tại Đại học Moscow đã nghiên cứu thành công quá trình gia công tia lửa điện có kiểm soát bằng cách nhúng các điện cực trong chất lỏng điện môi để ổn định quá trình phóng tia lửa. Họ đã phát minh ra máy *EDM* kiểu *R-C* (dùng mạch điện trở – tụ điện, còn gọi là mạch Lazarenko) để gia công các vật liệu khó gia công như wolfram. Song song đó, một nhóm nghiên cứu tại Mỹ (Harold Stark, Victor Harding, Jack Beaver) cũng chế tạo máy *EDM* nhằm rút mũi khoan gậy khỏi chi tiết nhôm, sử dụng các máy khắc điện cải tiến. Máy của họ ban đầu chỉ tạo được khoảng 60 tia lửa mỗi giây, về sau nâng cấp dùng mạch đèn điện tử chân không tạo hàng ngàn tia lửa mỗi giây, tăng đáng kể tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*).

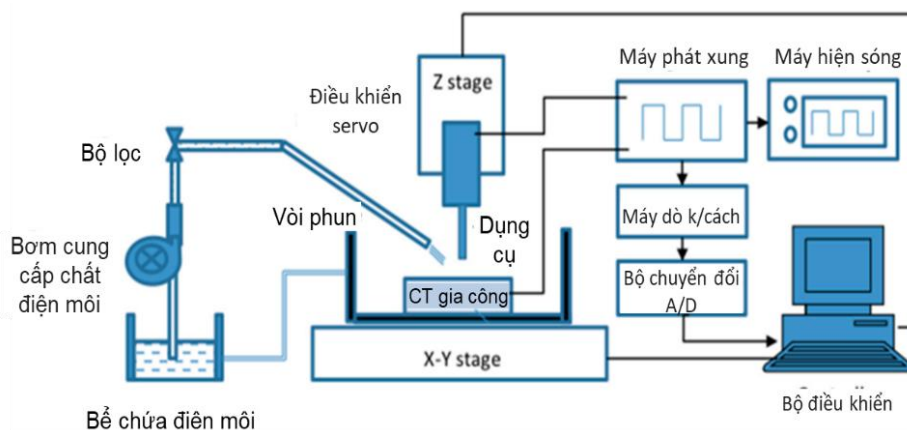
Từ những năm 1950 trở đi, công nghệ *EDM* phát triển mạnh mẽ. Chính B.Lazarenko năm 1950 đã phát triển hệ thống *EDM* sử dụng mạch điện trở - tụ điện (*RC*) để kiểm soát quá trình phóng điện [28]. Đến thập niên 1960, các máy *EDM* cải tiến dùng mạch phát xung bán dẫn đã ra đời, giải quyết được nhiều vấn đề về điện cực và ổn định quá trình [28]. Cũng trong thập niên 1960, phương pháp cắt dây *EDM* (*Wire-cut EDM*) được giới thiệu để gia công các khuôn dập từ thép đã tôi cứng. Chiếc máy cắt dây *NC* thương mại đầu tiên được chế tạo tại Liên Xô năm 1967, và máy cắt dây điều khiển số *CNC* đầu tiên ra đời năm 1976 tại Mỹ. Sang những năm 1970, công nghệ *EDM* có cuộc cách mạng lớn nhờ phát triển các máy phát xung công suất cao, dây cắt chuyên dụng và phương pháp sục rửa điện môi hiệu quả, cho phép gia công ổn định hơn kể cả với biên dạng phức tạp. Đến thập niên 1980, *EDM* kết hợp với điều khiển số bằng máy tính (*CNC*) đã được triển khai, giúp tự động hóa và nâng cao độ chính xác của quá trình. Kể từ đó, *EDM* nhanh chóng phổ biến toàn cầu như một kỹ thuật quan trọng để gia công các vật liệu dẫn điện tiên tiến (hợp kim cứng, composite, gốm dẫn điện, v.v.) trong chế tạo khuôn mẫu, linh kiện hàng không, ô tô, y tế. Do quá trình gia công không cần tiếp xúc cơ khí giữa điện cực và phôi nên *EDM* còn gia công được các chi tiết mỏng, dễ vỡ mà không gây hư hại [28].

Ngày nay, công nghệ *EDM* tiếp tục được phát triển theo nhiều hướng. Nhiều

biến thể *EDM* hiện đại ra đời nhằm nâng cao hiệu suất và mở rộng ứng dụng, như *micro-EDM* (gia công vi mô), *EDM* khô (*dry EDM*), *EDM* trong môi trường gần-khô, *EDM* cắt dây cải tiến, v.v. . Đặc biệt, *EDM* còn được kết hợp với các dạng năng lượng hỗ trợ khác tạo thành các quá trình gia công lai (hybrid). Ví dụ, kết hợp rung động siêu âm với *EDM* (hay *UV-EDM*) là một hướng nghiên cứu mới đầy hứa hẹn, giúp tăng đáng kể tốc độ bóc tách vật liệu khi gia công các vật liệu rất cứng [28]. Những tiến bộ này cho thấy *EDM* vẫn không ngừng được cải tiến để đáp ứng các yêu cầu ngày càng cao của sản xuất hiện đại.

1.1.2 Nguyên lý của gia công *EDM*

Hình 1.1 minh họa sơ đồ máy gia công xung điện, gồm có những bộ phận cơ bản sau: Máy phát xung một chiều, Bộ điều khiển servo, chi tiết gia công (phôi), bể chứa chất điện môi, bơm cung cấp chất điện môi, bộ lọc và điện cực [29]. Điện cực được gắn trên đầu máy, tiến dần vào phôi nhờ hệ thống điều khiển servo chính xác, cả hai ngập trong dung dịch dầu điện môi.



Hình 1.1 Sơ đồ gia công xung điện [29]

Khi vận hành, giữa điện cực và phôi không hề tiếp xúc cơ học mà chỉ có một khe hở nhỏ. Nguồn điện một chiều cung cấp các xung điện áp cao tạo ra trường điện giữa hai điện cực. Khi khoảng cách đủ gần và điện trường đủ lớn, chất điện môi bị phá vỡ cách điện, dẫn đến phóng tia lửa điện giữa điện cực và phôi. Dòng tia lửa với mật độ dòng điện cao tập trung ở vùng rất nhỏ trên bề mặt phôi, tạo nhiệt lượng cực lớn làm nóng chảy và bốc hơi một phần kim loại phôi ngay tại chỗ. Mỗi tia lửa điện chỉ tồn tại rất ngắn (cỡ 10^{-4} đến 10^{-7} giây) nhưng nhiệt độ vùng hồ quang có thể lên tới 12.000°C , đủ làm chảy và bay hơi vật liệu cục bộ [30]. Ngay sau đó, dòng điện ngắt và hồ quang tắt, chất điện môi mới lập tức được bơm vào khe hở để làm nguội nhanh, cuốn trôi các hạt vật liệu nóng chảy ra khỏi vùng gia công, đồng thời khôi phục điện trở cách điện cho khe hở. Lúc này bề mặt phôi xuất hiện một vết lõm nhỏ chính là phần vật liệu vừa bị lấy đi do tia lửa điện. Sau mỗi xung, điện áp phục hồi và quá trình phóng điện lại lặp lại khi điện cực tiến đủ gần tại vị trí khác trên bề mặt

phôi. Hàng loạt tia lửa điện được phóng liên tiếp như vậy trên toàn bề mặt gia công, tạo nên vô số vết lõm chồng sít nhau và kết quả là hình dáng của điện cực được sao chép lên phôi tạo ra bề mặt gia công có hình dạng mong muốn.

Trong quá trình gia công *EDM*, khoảng cách khe hở giữa dao và phôi luôn được duy trì ổn định nhờ hệ thống servo điều chỉnh vị trí điện cực theo trục tiến dao. Khi vật liệu phôi bị bóc dần, điện cực sẽ tự động tiến sâu hơn để giữ khe hở không đổi ở mức cho phép phóng tia lửa. Thông thường, khe hở phóng điện rất nhỏ (cỡ $0,005 \div 0,1$ mm) và không có tiếp xúc cơ học [31]. Điện cực dụng cụ thường được nối cực âm (cathode) và phôi nối cực dương (anode) của nguồn điện một chiều, nhờ đó tia lửa điện tập trung làm mòn phôi mạnh hơn và hạn chế mòn điện cực. Toàn bộ quá trình *EDM* diễn ra trong chất điện môi (thường là dầu hoặc nước khử ion) có vai trò cách điện đến một ngưỡng nhất định, đồng thời làm mát và tống phoi ra khỏi vùng gia công [31]. Chất điện môi cần có độ bền điện cao (để ngăn phóng điện sớm), đồng thời có tính cách nhiệt, độ nhớt phù hợp và khả năng đẩy phoi tốt để nhanh chóng phục hồi trạng thái cách điện sau mỗi xung phóng điện. Nếu không kịp đẩy mảnh phoi ra, chúng sẽ tích tụ trong khe hở gây ngắn mạch giả, làm quá trình phóng tia lửa tiếp theo trở nên không ổn định [31].

Nguyên lý gia công bằng tia lửa điện cho phép loại bỏ vật liệu mà không cần tiếp xúc giữa dụng cụ và chi tiết gia công. Nhờ đó mà *EDM* có nhiều ưu điểm độc đáo. Phương pháp này có thể gia công chính xác hầu hết các vật liệu dẫn điện, bất kể độ cứng, kể cả những vật liệu rất khó cắt gọt bằng phương pháp truyền thống như thép đã tôi, hợp kim cứng, carbide, titan, gốm dẫn điện. *EDM* có thể tạo được các hình dạng rất phức tạp hoặc biên dạng nhỏ tinh xảo (như lỗ sâu đường kính cực nhỏ, rãnh hẹp, hốc khuôn định hình) mà dao cắt thông thường khó thực hiện. Ngoài ra, do gần như không có lực cắt, *EDM* có thể gia công phôi mỏng manh, giòn, hoặc mềm dẻo mà không gây biến dạng cơ học. Tuy nhiên, nhược điểm của *EDM* là chỉ gia công được vật liệu dẫn điện (điện cực và phôi đều phải dẫn điện). Thêm vào đó, tốc độ cắt thường chậm hơn so với cắt gọt truyền thống nên với phôi lớn thường phải gia công thô trước khi tiến hành *EDM*. Hơn nữa, nhiệt độ cao cục bộ có thể tạo ra ứng suất nhiệt và biến dạng nhiệt trên phôi, đồng thời gây ra hiện tượng *tái đông đặc* kim loại nóng chảy trên bề mặt phôi (tạo lớp trắng - recast layer) và các vết nứt nhiệt nhỏ [32]. Do đó, *EDM* chủ yếu được áp dụng trong gia công tinh các chi tiết yêu cầu độ cứng cao, hình dạng phức tạp hoặc đòi hỏi độ chính xác mà phương pháp khác khó đáp ứng, hơn là để bóc vật liệu khối lượng lớn.

Về phân loại, *EDM* có hai dạng chính: xung định hình (*sinker EDM*) và cắt dây (*wire EDM*). Trong phương pháp gia công bằng tia lửa điện sử dụng xung định

hình, điện cực dụng cụ được chế tạo với hình dạng hình học đối nghịch với biên dạng hốc cần gia công. Trong quá trình gia công, điện cực được điều khiển tiến sâu dần vào phôi dưới sự kiểm soát của hệ thống servo, dẫn đến quá trình bóc vật liệu và hình thành biên dạng lòng khuôn theo hình dạng điện cực. Còn với máy cắt dây EDM, điện cực là sợi dây kim loại mảnh (thường bằng đồng thau hoặc molybden có đường kính khoảng 0,1-0,3 mm) được chạy theo biên dạng lập trình để cắt tách phôi. Loại này thích hợp tạo các đường bao phức tạp trên tấm kim loại. Ngoài ra, còn có các biến thể khác như EDM lỗ (máy khoan EDM chuyên khoan lỗ nhỏ sâu), *micro-EDM* (gia công vi mô cực nhỏ), EDM tạo hạt nano, và các hệ EDM lai kết hợp năng lượng khác (siêu âm, laser, trường từ...) để nâng cao hiệu quả gia công.

1.1.3 Các thông số cơ bản của quá trình EDM

Các yếu tố đầu vào ảnh hưởng đến quá trình gia công EDM bao gồm nhiều thông số công nghệ và có thể chia thành hai nhóm chính: thông số điện và thông số phi điện (cơ học, vật liệu, môi trường) [31]. Việc điều chỉnh phù hợp các thông số này có ý nghĩa quyết định để quá trình phóng tia lửa ổn định và đạt hiệu quả mong muốn [28]. Các thông số cơ bản của quá trình EDM:

a) Điện áp phóng điện (SV)

Là điện áp trung bình giữa hai điện cực trong quá trình phóng tia lửa. Điện áp đặt càng cao thì khe hở phóng điện cho phép càng lớn, nhưng đồng thời có xu hướng tăng kích thước tia lửa và độ rộng khe gia công [31]. Vật liệu điện cực và phôi có độ dẫn điện cao thường dùng mức điện áp thấp, còn với vật liệu dẫn kém phải dùng điện áp cao hơn. Điện áp phóng điện ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ bóc vật liệu, mòn điện cực và độ chính xác gia công: tăng điện áp thường tăng MRR nhưng có thể giảm độ chính xác [31].

b) Dòng điện xung (I_p)

Thể hiện cường độ dòng điện cao nhất chạy qua tia lửa trong mỗi xung phóng điện, thường ký hiệu I_p . Đây là thông số quan trọng bậc nhất, quyết định năng lượng của tia lửa điện. Dòng I_p càng lớn thì nhiệt lượng sinh ra càng lớn, do đó tăng tốc độ cắt (MRR) nhưng cũng làm tăng mòn điện cực (EWR) và tạo bề mặt thô hơn, đồng thời giảm độ chính xác kích thước [31]. Vì vậy, để gia công tinh đòi hỏi độ chính xác cao thường phải dùng dòng điện xung nhỏ; ngược lại gia công thô dùng dòng điện xung lớn để đẩy nhanh tiến độ chấp nhận bề mặt xấu hơn. Người ta cũng phát triển các vật liệu điện cực chịu mòn cao để có thể dùng với dòng điện xung lớn mà hạn chế hao mòn dụng cụ [31].

c) Thời gian phát xung (T_{on})

Là thời gian mỗi xung điện duy trì phóng tia lửa (còn gọi là độ rộng xung).

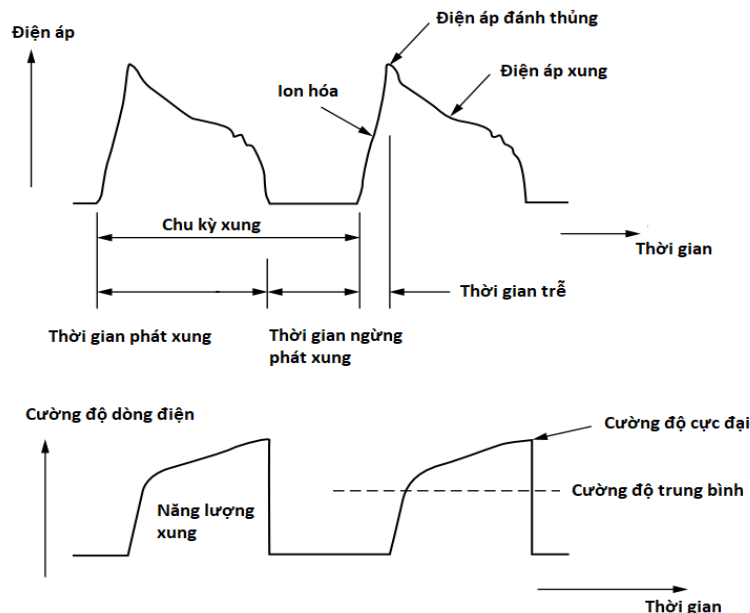
Thông số này cùng với cường độ dòng quyết định năng lượng mỗi tia lửa. Thời gian phát xung T_{on} dài hơn đồng nghĩa mỗi tia lửa kéo dài hơn và truyền nhiều nhiệt hơn vào phôi, do đó tăng lượng vật liệu mỗi lần phóng và thường tăng MRR [31]. Tuy nhiên, nếu T_{on} quá lớn có thể gây hồ quang kéo dài, làm hỏng bề mặt hoặc gây phóng điện không ổn định. Do vậy trong thực tế cần chọn T_{on} phù hợp với vật liệu và dòng điện để cân bằng giữa năng suất và chất lượng bề mặt.

d) Thời gian tắt xung (T_{off})

Là khoảng nghỉ giữa các xung liên tiếp khi không có phóng điện. Trong thời gian này, dung dịch điện môi được phục hồi và đẩy mảnh vụn phoi ra khỏi khe hở [31]. T_{off} quá ngắn sẽ không kịp xả sạch phoi, dễ dẫn đến tia lửa sau bị lệch hoặc tắt sớm do khe hở chưa được cách điện hoàn toàn (hiện tượng *ngắn mạch giả*). Ngược lại, T_{off} quá dài thì giảm tốc độ gia công (vì máy chờ lâu giữa các xung). Nói chung cần chọn T_{off} đủ để cuốn phoi hiệu quả mà không kéo dài hơn cần thiết [31]. Khi gia công tốc độ cao, người ta có thể chấp nhận T_{off} rất ngắn miễn là hệ thống sục rửa đủ mạnh để giữ ổn định quá trình.

e) Chu kỳ và tần số xung

Mỗi cặp T_{on} và T_{off} tạo thành một chu kỳ phóng điện. Tần số xung (số xung trên giây) là thông số liên quan đến quá trình EDM. Tần số xung cao (nhiều xung ngắn) thường cho bề mặt mịn hơn nhưng MRR thấp, còn tần số thấp (xung dài) cho năng suất cao hơn nhưng bề mặt thô hơn.



Hình 1.2 Dạng sóng của dòng điện và điện áp xung [29]

Hình 1.2 mô tả một các giai đoạn của một chu kỳ xung, bao gồm: Quá trình phát xung gồm các giai đoạn: Ion hóa và đánh thủng dung dịch điện môi, phát xung ổn định và ngừng phát xung (để xả phôi và khử ion hóa) [29].

f) Dạng sóng xung

Máy EDM hiện đại tạo xung điện có thể theo dạng chữ nhật, hình thang hoặc dạng tổ hợp. Nghiên cứu cho thấy dạng xung hình thang giúp giảm mòn điện cực hơn so với xung chữ nhật tiêu chuẩn. Một số máy còn bổ sung xung môi điện áp cao dòng thấp cực ngắn ngay trước mỗi xung chính để kích thích phóng điện ổn định hơn [31].

g) Cực tính (*Polarity*)

Là cách đấu cực của điện cực dao và phôi với nguồn điện. Tùy vật liệu và chế độ gia công mà chọn dao âm – phôi dương (cực tính thuận) hoặc dao dương – phôi âm (nghịch) [31]. Thông thường điện cực dụng cụ nổi cực âm và phôi nổi cực dương sẽ cho *MRR* cao hơn (vì ion dương nặng hơn bắn phá bề mặt phôi mạnh hơn) và giảm mòn điện cực, thích hợp gia công thô năng suất cao. Trong gia công tinh đòi hỏi độ chính xác cao, đôi khi dùng cực tính nghịch (dao dương) để tạo độ nhám bề mặt tốt hơn, tuy nhiên sẽ giảm tốc độ cắt và tăng mòn dao. Đối với máy cắt dây EDM, dây cắt thường nổi cực âm để vừa giữ tốc độ cắt nhanh, vừa hạn chế mòn dây (vì dây liên tục di chuyển nên phần mòn đi luôn được thay mới) [31].

h) Khe hở điện cực (*spark gap*)

Là khoảng cách nhỏ giữa bề mặt điện cực và phôi trong quá trình phóng điện. Khe hở này được hệ thống điều khiển servo duy trì tự động ở mức tối ưu (thường cỡ vài chục μm) [31]. Nếu khe hở quá lớn sẽ không phóng tia lửa được; ngược lại quá nhỏ sẽ gây xung ngắn mạch. Giá trị điện áp đặt và dòng servo sẽ quy định khe hở làm việc – ví dụ gia công tinh thường dùng điện áp thấp (khoảng 50 V) để khe hở nhỏ cho độ chính xác cao, còn gia công thô dùng điện áp cao (100÷300 V) cho khe lớn để cắt phá nhanh hơn chấp nhận độ chính xác thấp hơn [31].

i) Điện cực (*Electrode*)

Vật liệu, hình dạng và chất lượng chế tạo điện cực ảnh hưởng lớn đến kết quả gia công. Điện cực định hình trong máy xung quyết định trực tiếp độ chính xác hình dáng hốc gia công, do đó phải được chế tạo chính xác. Chọn vật liệu điện cực hợp lý cũng rất quan trọng, vì nó ảnh hưởng không chỉ độ chính xác mà còn đến năng suất và chi phí do mòn điện cực. Thông thường, các vật liệu điện cực phổ biến gồm: đồng đỏ, hợp kim đồng - wolfram, đồng thau, graphite, bạc - wolfram, nhôm, thép, thậm chí carbua rắn.... Đồng tinh khiết và đồng - wolfram được dùng nhiều nhờ dẫn điện tốt và mòn chậm. Graphite cũng được ưa chuộng vì gia công chế tạo điện cực dễ và tốc độ cắt cao, dù độ mòn hơi lớn hơn đồng. Giá điện cực và thời gian chế tạo có thể chiếm đến ~80% chi phí gia công EDM, nên việc tối ưu thiết kế điện cực (số lượng điện cực thô, bán tinh và tinh) có ý nghĩa kinh tế. Riêng ở máy cắt dây EDM, điện cực là cuộn dây kim loại nhỏ (thường bằng đồng thau hoặc hợp kim kẽm phủ) chạy

qua vùng cắt với tốc độ không đổi, do đó thông số liên quan đến dây như: đường kính dây, sức căng dây, tốc độ cuộn dây... cũng là những biến quan trọng quyết định độ ổn định và chính xác khi cắt.

j) Chất điện môi và phương pháp sục rửa

Như đã đề cập, chất điện môi thường dùng là dầu hỏa tinh chế (*hydrocarbon*) cho máy xung định hình và nước khử ion cho máy cắt dây. Các tính chất như độ cách điện, độ nhớt, điểm cháy, tính an toàn môi trường được cân nhắc khi chọn điện môi [31]. Trong quá trình *EDM*, *flushing* (sục rửa điện môi) đóng vai trò thiết yếu để đẩy mảnh vụn ra ngoài và làm mát vùng gia công. Có nhiều phương pháp sục rửa: bơm dòng chảy qua vòi phụt bên ngoài, xuyên dòng điện môi qua lỗ rỗng trong điện cực, rung lắc điện cực/phôi, hoặc kết hợp các cách trên. Hiệu quả *flushing* ảnh hưởng mạnh đến *MRR*, *TWR* và độ nhám bề mặt đạt được [31]. Nếu *flushing* kém, phoi tích tụ gây phóng điện không ổn định, dẫn đến *MRR* giảm và bề mặt có thể nhiều khuyết tật. Do đó, thiết lập chế độ áp lực bơm, hướng tia phun, hay chu kỳ bơm-hút phù hợp là cần thiết để quá trình được liên tục.

k) Các thông số cơ khí trong EDM

Ngoài những yếu tố trên, một số thông số phi điện khác cũng tác động đến quá trình *EDM*. Chẳng hạn, tốc độ di chuyển điện cực (*feed rate*) do servo điều khiển sẽ ảnh hưởng đến duy trì khe hở ổn định; chuyển động quay của điện cực hoặc phôi có thể được áp dụng để cải thiện khả năng xả phoi và phân bố tia lửa đều hơn [31]. Nghiên cứu cho thấy việc quay điện cực giúp tăng cường *flushing* trong lỗ sâu, nhờ đó giảm độ nhám bề mặt và tăng *MRR*, đồng thời giảm mật độ vết nứt và lớp trắng trên bề mặt chi tiết [31]. Tương tự, rung động điện cực ở tần số siêu âm (*UV-EDM*) là một biện pháp hiệu quả để loại bỏ phoi nhanh khỏi khe hở, cho phép dùng xung với năng lượng cao hơn mà vẫn ổn định, từ đó tăng đáng kể lượng bóc vật liệu so với *EDM* thường khi gia công vật liệu cứng [28]. Những yếu tố khác như nhiệt độ chất điện môi, độ ẩm môi trường, hay độ ổn định nguồn điện... thường ít được điều chỉnh trực tiếp nhưng cũng có thể ảnh hưởng gián tiếp đến quá trình phóng điện.

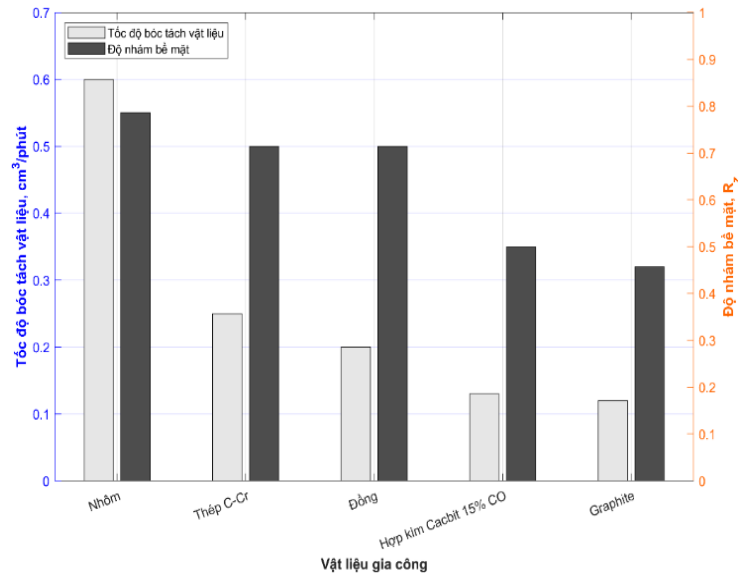
1.1.4 Các chỉ tiêu đầu ra đánh giá quá trình EDM

Hiệu quả của quá trình *EDM* được đánh giá thông qua các chỉ tiêu đầu ra đặc trưng cho tốc độ, chi phí dụng cụ và chất lượng sản phẩm [31]. Những đại lượng quan trọng nhất thường được sử dụng gồm có:

a) Tốc độ bóc vật liệu (*MRR*)

Đây là chỉ tiêu đo lường năng suất gia công – thường tính bằng lượng thể tích hoặc khối lượng vật liệu phôi được lấy đi trong một đơn vị thời gian ($\text{mm}^3/\text{phút}$ hoặc $\text{gram}/\text{phút}$). *MRR* càng cao nghĩa là quá trình cắt càng nhanh, năng suất càng lớn [31].

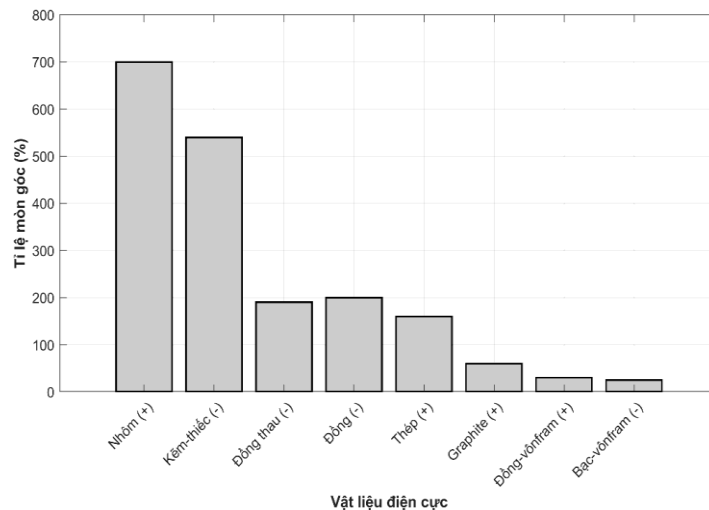
Giá trị MRR trong EDM phụ thuộc vào vật liệu gia công (Hình 1.3) và thông số chế độ cắt: dòng điện lớn, xung dài, điện áp cao, v.v. thường cho MRR cao. Tuy nhiên MRR tăng thường đi kèm đánh đổi về độ nhám bề mặt xấu hơn hoặc tăng mòn điện cực. Do đó trong nghiên cứu và sản xuất, mục tiêu thường là tối ưu hóa MRR đồng thời thỏa mãn các yêu cầu chất lượng bề mặt và độ chính xác. Nhiều công trình nghiên cứu đã tập trung tìm cách nâng cao MRR thông qua cải tiến công nghệ và tối ưu hóa tham số [31], ví dụ sử dụng bột dẫn điện trong điện môi, dùng xung phụ trợ, hay như đề tài này là rung siêu âm điện cực để đẩy nhanh quá trình cắt.



Hình 1.3 Ảnh hưởng của vật liệu gia công đến MRR và R_a [2]

b) Tỷ lệ mòn điện cực (TWR)

TWR đặc trưng cho mức độ hao mòn dụng cụ trong quá trình EDM , thường định nghĩa là lượng vật liệu điện cực bị mòn đi trên mỗi đơn vị thời gian hoặc tỷ lệ so với lượng vật liệu phôi được cắt. Điện cực cũng bị ăn mòn bởi tia lửa điện (đặc biệt ở cực dương), dẫn đến mòn và thay đổi hình dạng điện cực theo thời gian [31].



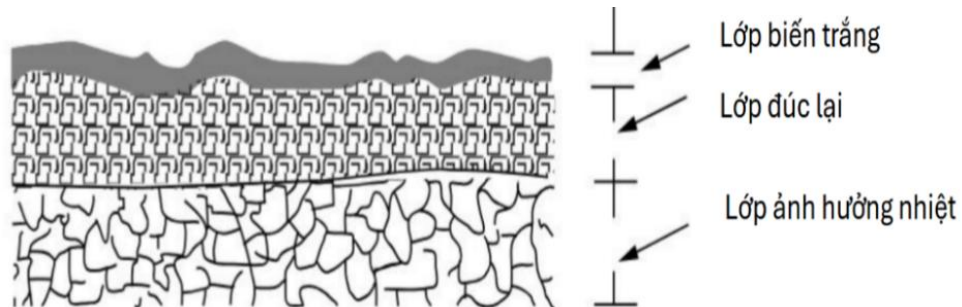
Hình 1.4 Ảnh hưởng của vật liệu điện cực đến độ mòn điện cực [3]

Mòn điện cực quá lớn sẽ làm sai lệch kích thước và hình dáng hốc gia công, tăng chi phí do phải thay điện cực mới hoặc hiệu chỉnh bù thường xuyên [31]. Do đó, giảm mòn điện cực là mục tiêu quan trọng nhằm đảm bảo độ chính xác và kinh tế. *TWR* thường tăng khi dùng dòng lớn, xung dài, điện áp cao hoặc cực tính nghịch.

Vật liệu điện cực ảnh hưởng mạnh đến *TWR* (Hình 1.4). Chẳng hạn điện cực wolfram hoặc than chì có tính chịu mòn tốt hơn đồng trong một số điều kiện gia công. Nhiều nghiên cứu đã phát triển kỹ thuật giảm mòn, như dùng dòng xung hình thang [31], cực tính phù hợp, hoặc phương pháp bù quỹ đạo điện cực (orbiting) để hạn chế ảnh hưởng của mòn đến độ chính xác hốc.

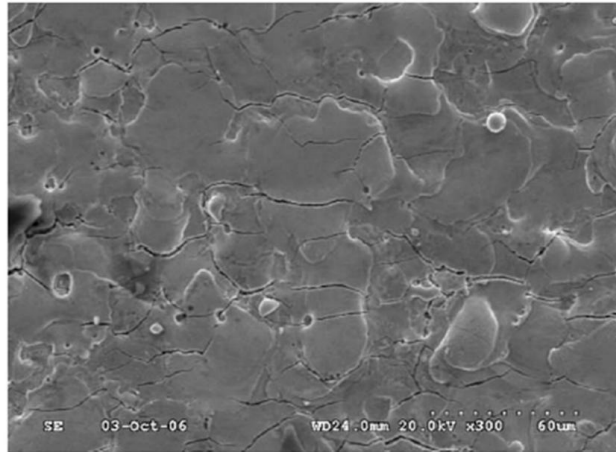
c) Chất lượng bề mặt gia công

Đây là nhóm chỉ tiêu phản ánh tình trạng bề mặt của chi tiết sau khi gia công *EDM*. Do *EDM* là quá trình gia công nhiệt, bề mặt chi tiết thường chịu ảnh hưởng của nhiệt và có những đặc điểm riêng so với bề mặt gia công cơ. Ngoài ra, chất lượng bề mặt *EDM* còn phụ thuộc vào vật liệu gia công (Hình 1.3). Các thành phần chính để đánh giá chất lượng bề mặt gồm: độ nhám bề mặt (*Ra*), độ sâu vùng ảnh hưởng nhiệt (*Heat Affected Zone, HAZ*) và chiều dày lớp tái đúc (*recast layer* hay “lớp trắng”), cùng mật độ vết nứt nhỏ trên lớp bề mặt [31].



Hình 1.5 Cấu trúc lớp bề mặt sau EDM [2]

Hình 1.5 thể hiện cấu trúc lớp bề mặt sau khi gia công xung điện. Lớp kim loại tái đông đặc màu trắng do kim loại nóng chảy từ tia lửa điện làm nguội nhanh và dính lại trên phôi. Lớp trắng này có độ cứng cao nhưng giòn và chứa ứng suất dư, thường dày vài chục microm (tùy chế độ) và phải được loại bỏ bằng mài hoặc đánh bóng nếu ảnh hưởng xấu đến sản phẩm. Phía dưới lớp trắng là vùng ảnh hưởng nhiệt với cấu trúc vi mô biến đổi và đôi khi xuất hiện các vết nứt nhiệt vi mô do ứng suất nhiệt [31] (Hình 1.6). Chất lượng bề mặt này chịu ảnh hưởng lớn bởi chế độ gia công: dòng điện xung và thời gian xung càng cao thì bề mặt càng thô, lớp trắng càng dày và vết nứt càng nhiều [28]. Ngược lại, chế độ tinh xung nhỏ, hoặc có biện pháp như dùng điện cực quay/rung giúp cải thiện việc tản nhiệt và thoát phoi sẽ cho bề mặt tốt hơn (nhám thấp, ít nứt) [31].



Hình 1.6 Vết nứt tế vi trên bề mặt gia công EDM [4]

d) Độ chính xác gia công

Đây cũng là một khía cạnh đầu ra quan trọng, thể hiện qua độ sai lệch kích thước và hình dáng của chi tiết so với yêu cầu. Trong *EDM*, một số yếu tố gây giảm chính xác gồm có độ cắt quá mức (*overcut*) - *Overcut* được định nghĩa là mức độ mà kích thước hốc gia công vượt quá kích thước danh nghĩa của điện cực trên mỗi phía. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ việc phóng tia lửa không chỉ diễn ra tại bề mặt đầu điện cực mà còn xảy ra dọc theo hai bên hông điện cực. Bên cạnh đó, sự tồn tại bất buộc của khe hở phóng điện và sự lan rộng của vùng plasma trong quá trình phóng điện cũng làm cho vật liệu bị loại bỏ theo phương ngang, dẫn đến sai lệch biên dạng. Hiện tượng này luôn tồn tại trong *EDM* và chỉ có thể giảm thiểu thông qua điều chỉnh tham số xung. Hiện tượng cắt quá mức làm kích thước hốc lớn hơn điện cực, nhất là khi gia công lỗ nhỏ hoặc chi tiết tinh xảo [33]. Ngoài ra, mòn điện cực trong quá trình cũng làm kích thước hốc gia công lớn dần nếu không bù trừ. Độ côn, độ không thẳng đứng của vách hốc do tia lửa lan rộng ở vùng sâu cũng ảnh hưởng hình dáng. Để nâng cao chính xác, thường áp dụng: gia công nhiều lượt (thô, bán tinh và tinh), bù quỹ đạo điện cực (*orbiting*) để giảm ảnh hưởng mòn, và giảm năng lượng xung khi gần đạt kích thước yêu cầu (giảm dòng, điện áp) [31]. Với máy cắt dây, độ chính xác thể hiện qua độ sai khác giữa biên dạng cắt so với bản vẽ, độ côn vết cắt, độ nhám cạnh cắt, v.v. Các máy *EDM CNC* hiện đại có thể đạt độ chính xác đến vài micron. Nhìn chung, độ chính xác đạt được là kết quả tổng hợp của việc tối ưu các thông số và hiệu chỉnh công nghệ phù hợp với yêu cầu sản phẩm.

Tóm lại, quá trình *EDM* cần được đánh giá đa tiêu chí qua các chỉ tiêu *MRR*, *TWR*, chất lượng bề mặt và độ chính xác. Thông thường có sự đánh đổi: ví dụ tăng *MRR* sẽ tăng *TWR* và tăng *Ra*. Do đó nhiệm vụ đặt ra là tìm điểm tối ưu tùy theo mục tiêu gia công.

Trong nghiên cứu này, với mục tiêu gia công bề mặt trụ ngoài bằng *EDM* có

trợ giúp siêu âm, các chỉ tiêu như tốc độ bóc vật liệu, mòn điện cực và chất lượng bề mặt (độ nhám, lớp trắng) sẽ được xem xét kỹ lưỡng. Việc tổng quan về *EDM* ở chương này tạo nền tảng để hiểu rõ hơn các kết quả và phân tích sẽ trình bày trong các chương tiếp theo của luận án.

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

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

Gia công xung điện (*EDM*) là phương pháp gia công tiên tiến cho phép gia công các vật liệu cứng dẫn điện bằng cơ chế ăn mòn do tia lửa điện. Tuy nhiên, *EDM* truyền thống gặp nhiều hạn chế về tốc độ và chất lượng bề mặt, đặc biệt khi gia công các lỗ sâu hoặc khe hẹp. Nguyên nhân chủ yếu là do quá trình phóng tia lửa sinh ra nhiều mảnh vụn và bong bóng khí trong khe hở, gây cản trở phóng điện tiếp tục cũng như làm gia tăng mòn điện cực và giảm độ ổn định quá trình. Một trong những hướng cải tiến quan trọng nhằm nâng cao hiệu suất và chất lượng gia công *EDM* là sử dụng rung động siêu âm hỗ trợ trong quá trình gia công. Ngay từ những nghiên cứu đầu tiên, người ta đã nhận thấy rằng rung động siêu âm áp dụng lên điện cực hoặc phôi có ảnh hưởng tích cực đến quá trình *EDM*. Cụ thể, Kremer và cộng sự (1991) đã chứng minh rằng việc rung điện cực ở tần số siêu âm có thể làm tăng đáng kể tốc độ bóc tách vật liệu trong *EDM* [34]. Tiếp đó, Shervani-Tabar và cộng sự (2007) thực hiện nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm về rung động của điện cực trong *EDM*, kết luận rằng rung động hỗ trợ giúp cải thiện rõ rệt tính năng cắt gọt của quá trình [35]. Khi gia công lỗ sâu, hiện tượng hồ quang kéo dài và đoản mạch dễ xảy ra, làm tăng nhanh mòn điện cực; nhược điểm này càng trầm trọng khi chiều sâu gia công tăng [36]. Việc tích hợp rung động siêu âm vào quá trình *EDM* được xem là giải pháp hữu hiệu để khắc phục các hạn chế trên, nhờ khả năng cải thiện quá trình loại bỏ mảnh vụn và ổn định hồ quang phóng điện [36].

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng rung động siêu âm tạo ra dao động tuần hoàn trong vùng gia công, giúp “khuấy” mạnh môi trường điện môi và cuốn trôi mảnh vụn ra khỏi vùng phóng điện một cách hiệu quả [36, 37]. Nhờ đó, khoảng cách phóng điện luôn được làm mới và duy trì ổn định, giảm thiểu hiện tượng phóng điện bất thường (như phóng hồ quang kéo dài hoặc đoản mạch) [36, 37]. Ví dụ như, nghiên cứu của Chen và cộng sự (2024) cho thấy khi áp dụng rung siêu âm phương ngang cho phôi trong gia công lỗ sâu bằng *EDM*, hiệu suất khoan tăng khoảng 33%÷42% so với *EDM* thông thường, đồng thời mòn điện cực giảm khoảng 36% [36]. Tương tự, Wang và cộng sự [38] báo cáo rằng *EDM* trợ giúp siêu âm có thể giảm độ mòn điện cực 51,7% và độ côn lỗ khoan 33,5% so với *EDM* thường. Như vậy, rung động siêu âm giúp gia công *EDM* đạt tốc độ bóc vật liệu cao hơn và nâng cao tuổi thọ điện

cực, và nó đặc biệt hữu ích khi gia công lỗ sâu, lỗ nhỏ có tỷ số chiều sâu/đường kính lớn - vốn là trường hợp mà EDM truyền thống gặp nhiều khó khăn do khó thoát mảnh vụn [37].

Bên cạnh việc tăng tốc độ bóc tách vật liệu và giảm mòn, rung động siêu âm còn cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt chi tiết gia công. Các hạt mảnh vụn và bong bóng khí được loại bỏ hiệu quả giúp bề mặt gia công ít khuyết tật hơn và giảm thiểu các vết cháy cục bộ do tích tụ nhiệt [36]. Chen và cộng sự quan sát thấy thành vách lỗ sau khi gia công với rung siêu âm nhẵn mịn hơn nhiều (độ nhám $Ra \sim 1,5 \div 2 \mu\text{m}$) so với trường hợp không rung ($Ra \sim 4 \mu\text{m}$), đồng thời hiện tượng sụp vách trong lỗ sâu gần như được loại bỏ nhờ siêu âm hỗ trợ đẩy phoi ra khỏi lỗ [36]. Bui và cộng sự [39] cũng ghi nhận rằng ứng dụng rung động siêu âm trong EDM trộn bột đã làm giảm đáng kể mật độ vết nứt nhỏ (*micro-cracks*) trên bề mặt lớp phủ bạc kháng khuẩn tạo ra, đồng thời phân bố bạc trong lớp phủ đồng đều hơn so với khi không có rung siêu âm. Điều này chứng tỏ rung siêu âm giúp cải thiện tính nguyên vẹn bề mặt cũng như tính chất chức năng của lớp bề mặt. Ngoài ra, rung động siêu âm còn giúp giảm ứng suất dư và chiều dày lớp biến cứng bề mặt do quá trình phóng điện gây ra, nhờ tăng cường khả năng rửa trôi và làm nguội nhanh bề mặt sau mỗi xung phóng điện thông qua sự lưu thông hiệu quả hơn của chất điện môi [39].

Một lợi ích quan trọng khác của rung siêu âm là nâng cao khả năng gia công các vật liệu khó gia công. Những vật liệu như hợp kim titan, gốm kỹ thuật, hợp kim cứng (WC-Co) vốn rất khó gia công bằng phương pháp truyền thống, nhưng EDM kết hợp rung động siêu âm đã cho thấy hiệu quả rõ rệt. Ví dụ, Abdullah và Shabgard [22] khi gia công hợp kim WC-Co bằng EDM có rung siêu âm đã đạt tốc độ bóc vật liệu cao hơn và giảm mòn điện cực so với EDM thường, nhờ rung động giúp phá vỡ nhanh lớp bột WC nung chảy và đẩy chúng ra khỏi vùng gia công. Tương tự, Praneetpong và cộng sự [40] ứng dụng EDM kết hợp rung siêu âm để gia công gốm Si_3N_4 cho thấy rung siêu âm cải thiện đáng kể độ ổn định phóng điện và giảm hiện tượng bỏ lửa khi gia công vật liệu gốm dẫn điện kém. Các nghiên cứu trên khẳng định sự cần thiết phải ứng dụng rung động siêu âm nhằm nâng cao hiệu quả EDM, đặc biệt đối với chi tiết hình dáng phức tạp hoặc vật liệu có tính chất đặc biệt.

Tóm lại, rung động siêu âm đem lại nhiều lợi ích thiết thực cho quá trình EDM: tăng tốc độ gia công nhờ cải thiện việc loại bỏ mảnh vụn, giảm mòn điện cực và sai lệch kích thước (như độ côn) [37], cũng như nâng cao chất lượng bề mặt chi tiết (giảm nứt, giảm độ nhám) [36, 39]. Điều này đặc biệt quan trọng khi gia công các chi tiết yêu cầu độ chính xác cao, lỗ sâu, kích thước vi mô hoặc vật liệu cứng. Chính vì vậy, tích hợp rung động siêu âm vào hệ thống máy EDM đang trở thành hướng phát triển

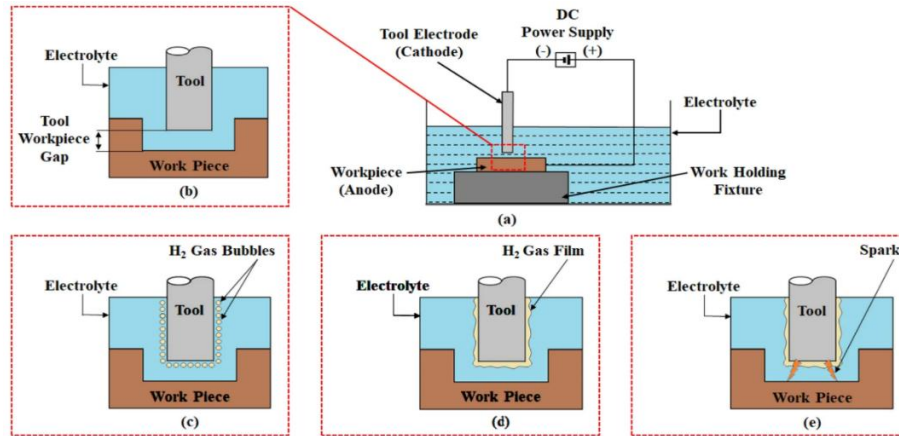
đề nâng cao năng suất và chất lượng gia công trong nhiều ứng dụng công nghiệp hiện đại.

1.2.2 Nguyên lý tác động của rung động siêu âm trong EDM

Rung động siêu âm là dao động cơ học có tần số cao (thường từ 20 kHz trở lên) được tạo ra nhờ các đầu phát dao động (thường là đầu dò piezoelectric hoặc từ giảo) truyền vào dụng cụ hoặc phôi. Khi áp dụng vào quá trình EDM, rung động siêu âm tác động lên cả môi trường điện môi lẫn quá trình phóng tia lửa, tạo ra nhiều hiệu ứng tích cực.

Trước hết, rung động siêu âm gây ra hiện tượng dao động áp suất tuần hoàn trong chất lỏng điện môi. Ở tần số siêu âm, chất lỏng luân phiên trải qua các chu kỳ nén và giãn, hình thành vô số vi bong bóng (bong bóng khí chân không) – hiện tượng này gọi là xâm thực thủy khí (*cavitation*). Các bong bóng vi mô này liên tục hình thành và vỡ tan với tốc độ cao, tạo ra các tia chất lỏng vi mô (micro-jet) và sóng xung kích cục bộ [41]. Kết quả là dòng chảy trong khe hở gia công được tăng cường xáo động, qua đó hỗ trợ vận chuyển các mảnh vụn (phoi) ra khỏi vùng phóng điện hiệu quả hơn đáng kể so với trường hợp không áp dụng rung động [36, 42].

Mô phỏng dòng chảy khe hẹp trong EDM cho thấy rung động siêu âm của điện cực làm tăng vận tốc dòng chảy trong khe hẹp và thúc đẩy chuyển động của phoi, nhờ đó mảnh vụn dễ được đẩy ra vùng ngoài và mang đi theo dòng chất điện môi [37, 42]. Để tạo dao động cho phôi trong quá trình gia công, sơ đồ hệ thống máy EDM có tích hợp bộ rung động siêu âm được minh họa như Hình 1.7. Dao động siêu âm truyền qua điện cực và phôi, liên tục rung lắc phôi và lớp chất điện môi, tạo dòng chảy rối trong vùng gia công, quét sạch mảnh vụn và bong bóng khỏi khe hở. Thêm vào đó, rung động siêu âm làm thay đổi động học khe hở phóng điện: nếu rung ở điện cực, đầu điện cực sẽ dao động qua lại với biên độ nhỏ (vài μm), dẫn đến khoảng cách khe hở EDM biến thiên tuần hoàn theo thời gian. Sự thay đổi khe hở này có tác dụng như một bơm vi sai, hút đẩy chất điện môi vào/ra khe giúp thay mới điện môi liên tục sau mỗi lần phóng tia lửa [42]. Đồng thời, việc điện cực dao động nhẹ cũng giúp tách các hạt phoi bám dính trên bề mặt điện cực hoặc phôi, ngăn ngừa hiện tượng “cầu dẫn” do phoi bắc giữa hai cực gây đoản mạch. Kremer và cộng sự [34] từ năm 1991 đã phát hiện rằng nếu đồng bộ hóa xung phóng điện với chu kỳ rung động (phát tia lửa tại thời điểm khoảng cách khe lớn nhất), có thể tối ưu hiệu ứng này, giúp phóng điện ổn định hơn và giảm hiện tượng ngắt quãng do phoi gây ra. Mặc dù nghiên cứu của Kremer khá sớm, nhưng nó đặt nền móng lý thuyết cho việc kết hợp rung động trong EDM nhằm kiểm soát tốt hơn quá trình phóng tia lửa.



Hình 1.7 Sơ đồ hệ thống máy EDM có tích hợp bộ rung động siêu âm [37]

Một hiệu ứng quan trọng khác của rung siêu âm là giảm sự tập trung nhiệt cục bộ. Nhờ phoi và bong bóng được lấy đi nhanh, vùng phóng điện được cung cấp điện môi sạch có hằng số điện môi đồng đều, dẫn đến tia lửa phân bố ngẫu nhiên trên bề mặt gia công thay vì tập trung nhiều lần một chỗ. Quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (*SEM*) cho thấy khi có rung siêu âm, tỷ lệ vết phóng điện bình thường tăng lên, còn các vết phóng dạng hồ quang kéo dài hoặc ngắt quãng giảm đi rõ rệt [36]. Shabgard và cộng sự [43] sử dụng *SEM* và *X-Ray* nhận thấy rung động của dụng cụ làm tăng số lượng phóng điện có ích, giảm số xung phóng bị tắt sớm hoặc chuyển thành hồ quang, từ đó cải thiện chất lượng bề mặt gia công. Điều này liên quan mật thiết đến việc rung động giúp phân tán năng lượng phóng điện trên diện tích rộng hơn, tránh lặp lại phóng điện nhiều lần ở một điểm gây quá nhiệt và nứt tế vi bề mặt [43].

Ngoài ra, rung động siêu âm còn tạo ra áp lực cơ học hỗ trợ lên phôi trong lúc gia công. Đặc biệt trong các quá trình *EDM* có bột trộn (*PM-EDM*) hoặc *EDM* trong môi trường khí, rung siêu âm giúp phân tán đều các hạt bột và khí, tăng xác suất chúng tham gia vào kênh phóng điện [42, 44]. Bui và cộng sự [39] cho biết khi trộn bột nano bạc vào *EDM* để phủ bề mặt, việc bổ sung rung siêu âm đã tăng hàm lượng bột bạc lắng đọng vào lớp phủ, do sóng siêu âm giữ cho các hạt bột lơ lửng đều trong khe hở, tránh lắng đọng sớm. Đồng thời, rung siêu âm làm giảm số lượng vết nứt nhiệt trong lớp phủ, nhờ các xung kích siêu âm làm tách lớp bột khí bám trên bề mặt nóng chảy và giúp kim loại lỏng điền đầy đều đặn hơn [39, 45].

Tóm lại, về nguyên lý, 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 thủy khí 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 phôi. Các cơ chế này phối hợp làm tăng tính ổn định của quá trình EDM và nâng cao chất lượng, hiệu suất gia công.

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

Trong lĩnh vực EDM, rung động siêu âm đã và đang được ứng dụng dưới nhiều hình thức đa dạng. Xét về bản chất, có thể phân loại các phương pháp rung siêu âm theo các tiêu chí: Phương thức dao động (hướng và dạng dao động); Bộ phận được rung động; Kết hợp với quá trình gia công cụ thể.

a) Phân loại theo hướng và dạng dao động

Dạng phổ biến nhất là rung động siêu âm theo phương thẳng đứng (hướng dọc trục), tức là dụng cụ hoặc phôi dao động tịnh tiến theo phương vuông góc với bề mặt gia công. Kiểu dao động này đã được áp dụng từ sớm trong EDM, giúp thay đổi chu kỳ khe hở theo trục z . Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây phát triển rung siêu âm theo phương xoắn (thẳng góc với trục, tạo mô-men xoắn) hoặc kết hợp đồng thời cả dao động dọc và xoắn. Yin và cộng sự [45] đã đề xuất một hệ thống rung siêu âm kết hợp dọc - xoắn (*longitudinal - torsional vibration, LTV*) cho điện cực EDM, cho phép đầu điện cực vừa dao động lên xuống vừa xoay nhẹ quanh trụ. Kết quả cho thấy dạng dao động LTV này giúp giảm hiện tượng côn lỗ khi khoan lỗ *micro-EDM* nhờ dòng chảy xoáy cuốn phoi đều quanh thành lỗ, đồng thời tăng độ đồng nhất của bề mặt lỗ [38]. Tương tự, Z Yin và cộng sự đã phát triển điện cực dao động theo quỹ đạo tròn 2D (*ultrasonic circular vibration, UCV*) cho *micro-EDM*, tức là đầu điện cực mô tả một vòng tròn rất nhỏ với tần số siêu âm trong mặt phẳng ngang [45]. Cách rung 2 chiều này giúp phoi không chỉ được đẩy theo một trục mà còn phân tán theo phương ngang, nhờ đó giảm bám dính phoi trên thành vách và cải thiện độ nhám bề mặt lỗ vi mô [46]. Các thí nghiệm của Li và cộng sự [47, 48] chứng minh rằng điện cực rung UCV đã cải thiện độ nhám bề mặt và độ tròn của lỗ trong *micro-EDM*, đồng thời giảm độ sâu khe hở không đồng đều khi gia công vi rãnh. Gần đây hơn, Hou và cộng sự [49] đề xuất phương pháp rung siêu âm 3 chiều tương đối (*relative 3D ultrasonic vibration, RTDUV*), trong đó điện cực thực hiện dao động theo quỹ đạo không gian phức tạp để tối ưu việc cuốn phoi. Phương pháp RTDUV được báo cáo giúp tăng khả năng thoát phoi trong gia công hốc vi mô và hỗ trợ gia công ổn định các hốc có tỷ lệ chiều sâu/rộng lớn.

Như vậy, có nhiều biến thể của rung động siêu âm được phát triển để phù hợp với từng bài toán gia công cụ thể. Lựa chọn dạng rung thích hợp có thể tối ưu hóa hiệu quả: ví dụ, gia công lỗ sâu vi mô có thể ưu tiên rung LTV hoặc UCV để giảm côn và kẹt phoi [38]. Gia công hốc rộng nông có thể chỉ cần rung dọc trục để tăng tốc thoát phoi thẳng đứng. Xu hướng hiện nay là kết hợp nhiều dạng dao động (ví dụ LTV

kết hợp *UCV*) nhằm tận dụng ưu điểm đa hướng, cũng như thiết kế đầu rung đặc thù cho từng nguyên công.

Bảng 1.1 Các dạng rung động siêu âm trong EDM và tác dụng chính

Dạng dao động siêu âm	Mô tả	Tác dụng chính
Rung dọc trục (<i>ID</i>)	Dao động tịnh tiến theo phương dọc trục của điện cực/phôi.	Tăng cường bơm điện môi, thoát phoi theo trục; giảm phoi bám đáy lỗ [37].
Rung xoắn (<i>ID</i> xoắn)	Dao động quay/dao động góc nhỏ quanh trục.	Tạo lực xoáy tách phoi khỏi thành lỗ, giảm côn và kẹt phoi [38]
Rung kết hợp dọc-xoắn (<i>LTV</i>)	Kết hợp đồng thời dao động tịnh tiến và xoay nhẹ.	Thoát phoi tốt hơn, bề mặt lỗ đồng đều hơn [38].
Rung quỹ đạo tròn 2D (<i>UCV</i>)	Điện cực dao động theo vòng tròn nhỏ trong mặt phẳng ngang.	Phân tán phoi 360°, cải thiện độ tròn và giảm sai lệch vị trí lỗ [1, 46]
Rung ngang (phương ngang của phôi)	Phôi dao động ngang, điện cực đứng yên [50].	Tạo dòng chảy ngang cuốn phoi ra ngoài lỗ, giảm mòn bên điện cực, cải thiện thành lỗ [36].

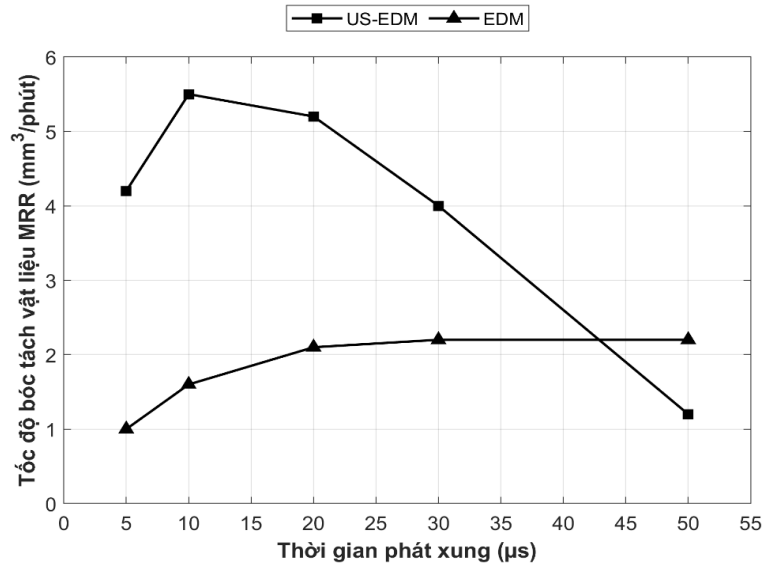
b) Phân loại theo bộ phận được rung

Rung động siêu âm trong *EDM* có thể được áp dụng vào điện cực dụng cụ, phôi gia công, hoặc thậm chí môi trường điện môi. Mỗi cách có ưu điểm và nhược điểm riêng:

- Rung điện cực: Đây là cách phổ biến nhất – gắn đầu biến tử siêu âm vào trục điện cực để làm điện cực dao động. Ưu điểm là truyền dao động trực tiếp vào vùng phóng điện một cách cục bộ, hiệu quả thoát phoi cao tại vị trí gia công. Hầu hết các nghiên cứu về *micro-EDM* dùng cách này do điện cực nhỏ dễ gắn đầu rung hơn so với rung cả phôi lớn [51]. Sundaram và cộng sự [51] đã tiến hành tối ưu hóa thông số cho *micro-EDM* rung điện cực và thu được chế độ công nghệ tối ưu cho mũi điện cực đồng 80 μm , cho thấy rung điện cực làm tăng đáng kể *MRR* ở các xung ngắn. Nhược điểm của rung điện cực là ở máy *EDM* lớn, việc gắn bộ rung vào đầu máy đôi khi phức tạp và có thể ảnh hưởng đến hệ thống cấp dây (với *EDM* dây) hoặc dẫn điện.

- Rung phôi: Là phương án rung cả chi tiết gia công hoặc đồ gá giữ phôi. Phương pháp này được Chen và cộng sự (2024) [36] áp dụng thành công: họ thiết kế một hệ thống rung siêu âm phương ngang cho bàn máy và làm phôi dao động qua lại trong khi điện cực cố định. Kết quả cho thấy rung phôi có thể không ảnh hưởng đến cơ cấu tiến dao của máy *EDM* và hệ thống tuần hoàn điện môi hiện có nhưng vẫn nâng cao

hiệu quả gia công đáng kể. Shabgard và cộng sự [1] cũng thử nghiệm rung phôi trong EDM lỗ cạn và nhận thấy ở thời gian phóng điện ngắn, MRR tăng tới 4 lần khi phôi rung siêu âm so với không rung (Hình 1.8). Điểm hạn chế của rung phôi là khi phôi rất lớn hoặc nặng thì khó đạt tần số cao, và rung cả phôi có thể tạo dao động cho toàn bộ bể dầu ảnh hưởng đến các điện cực khác (nếu gia công nhiều chi tiết đồng thời). Một cải tiến là rung cục bộ phôi (ví dụ: vùng gá phôi rung, phần khác không rung).

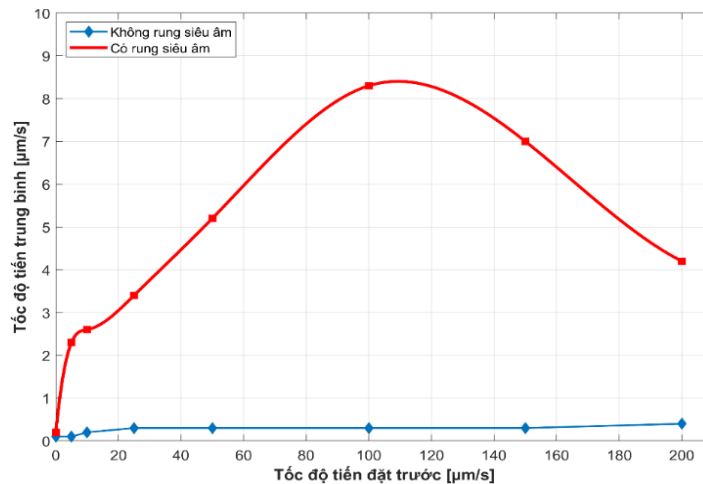


Hình 1.8 Ảnh hưởng của thời gian phát xung T_{on} đến MRR [1]

Hình 1.8 cho thấy MRR của $UV-EDM$ lớn hơn rõ rệt so với EDM truyền thống ở vùng thời gian phát xung T_{on} nhỏ đến trung bình, phản ánh vai trò tích cực của rung siêu âm trong việc tăng cường thái phôi và ổn định phóng điện. Khi T_{on} tăng cao, MRR của $UV-EDM$ giảm nhanh do mật độ phôi và năng lượng phóng điện lớn làm suy giảm hiệu quả hỗ trợ của rung siêu âm, trong khi MRR của EDM truyền thống tăng chậm và tiến tới bão hòa. Điểm giao nhau của hai đường đặc tính đánh dấu ranh giới chuyển tiếp, tại đó MRR của hai phương pháp là tương đương và ưu thế của $US-EDM$ không còn thể hiện rõ.

- Rung môi trường điện môi

Một số nghiên cứu rung chính môi trường gia công thay vì rung trực tiếp điện cực hay phôi. Ichikawa và Natsu [52] đã áp dụng rung siêu âm vào bể dầu điện môi khi gia công *micro-EDM* năng lượng rất thấp. Hình 1.9 cho thấy khi có trợ giúp của UV , tốc độ tiến của đầu EDM (tương ứng với năng suất gia công) của quá trình EDM tăng lên rõ rệt. Sở dĩ như vậy là vì việc rung chất lỏng tạo dòng tuần hoàn liên tục quanh vùng phóng điện, giúp thực hiện ổn định các tia lửa siêu nhỏ vốn dễ tắt nếu phôi không kịp thoát. Phương pháp này có ưu điểm triển khai đơn giản (gắn bộ rung vào thành bể chứa), nhưng nhược điểm là năng lượng siêu âm bị phân tán khắp bồn nên hiệu quả tại khe hở có thể không cao bằng rung trực tiếp.



Hình 1.9 Quan hệ giữa tốc độ tiến trung bình và tốc độ tiến đặt trước [52]

Ngoài ra, có thể kết hợp đồng thời rung cả điện cực và phôi để cộng hưởng hiệu ứng. Shervani-Tabar và cộng sự [53] đã mô phỏng trường hợp cả dụng cụ và phôi cùng rung siêu âm và cho thấy biên độ rung tổng hợp có thể tăng cường thêm lưu tốc dòng điện môi trong khe hở. Tuy nhiên, việc đồng bộ hai nguồn rung không đơn giản, do đó ít được áp dụng thực tế.

c) Phân loại theo quá trình gia công kết hợp

Rung động siêu âm được tích hợp không chỉ trong EDM truyền thống (*die-sinking EDM*) mà còn trong các biến thể và quy trình gia công kết hợp:

- *Micro-EDM*

Đây là lĩnh vực ứng dụng sôi động của rung siêu âm. Như đã đề cập, rung siêu âm giúp *micro-EDM* khắc phục nhược điểm khe hẹp khó thoát phoi [37]. Nhiều công bố về *micro-EDM* lỗ nhỏ, rãnh hẹp có rung động siêu âm cho thấy cải thiện rõ rệt về độ sâu khả thi và độ chính xác lỗ vi mô [37]. Xing và cộng sự [54] nghiên cứu ảnh hưởng thông số đến *micro-EDM* rung siêu âm đã lượng hóa tác động của biên độ, tần số rung lên *MRR* và độ lệch hình dáng lỗ, từ đó định hướng chọn thông số tối ưu cho gia công các vi kết cấu phức tạp.

- EDM có trộn bột (*PM-EDM*)

Kết hợp thêm bột dẫn điện vào điện môi giúp cải thiện bề mặt và tạo lớp phủ chức năng. Rung siêu âm trong *PM-EDM* càng làm tăng hiệu ứng này. Bên cạnh nghiên cứu của Bui [39] về phủ bạc kháng khuẩn đã nêu, Han và cộng sự [55] khi gia công gốm TiN trong môi trường EDM trộn bột cũng sử dụng rung siêu âm và thu được độ nhám bề mặt nhỏ hơn, ít lỗ khí, đồng thời hạt bột phân tán đều trong lớp tái đúc. Dong và cộng sự [56] còn kết hợp siêu âm + bột + phun tia điện môi để tăng cường hình thành bề mặt hợp kim hóa, cho thấy siêu âm làm tăng độ đồng đều phân bố nguyên tố hợp kim trên bề mặt.

- *EDM* trong khí/điện môi hạn chế (*dry EDM, near-dry EDM*)

Do không có chất lỏng lưu thông, *EDM* khô gặp vấn đề phoi khó thoát hơn. Rung siêu âm tỏ ra đặc biệt hữu dụng trong trường hợp này. Xu và cộng sự [57] chứng minh rằng rung siêu âm trong *EDM* khí trợ giúp các cơ chế bóc vật liệu ổn định hơn, nâng cao *MRR* khi gia công hợp kim cứng trong môi trường khí. Liao và Liang [21] áp dụng rung siêu âm trong khoan vi lỗ *EDM* với dịch chuyển nghiêng (*inclined feed*) cho thấy rung động giúp thổi bay muội than ra ngoài theo hướng nghiêng dễ dàng hơn, cải thiện độ sâu khoan đạt được.

- *EDM* kết hợp các trường vật lý khác

Một số nghiên cứu so sánh rung siêu âm với các hỗ trợ khác như từ trường. Gholipour và cộng sự [58] thực hiện đối chiếu giữa *EDM* rung siêu âm và *EDM* hỗ trợ từ trường trong gia công thép, cho thấy cả hai đều tăng *MRR* nhưng theo cơ chế khác nhau: rung siêu âm thiên về cơ học đẩy phoi, trong khi từ trường định hướng chuyển động phoi theo lực từ. Kết hợp cả hai (rung siêu âm + từ trường) có thể cho hiệu ứng cộng hưởng, nhưng cần thiết kế phức tạp. Lin và cộng sự [59] đã tích hợp thành công hệ thống *EDM* lai: rung siêu âm + lực từ hỗ trợ để gia công thép SKD61, kết quả đạt *MRR* cao hơn 20% so với chỉ rung đơn thuần, đồng thời bề mặt giảm độ nhám do hạt phoi bị từ trường kéo rời khỏi bề mặt nhanh hơn.

Tóm lại, rung động siêu âm có thể được triển khai linh hoạt trong nhiều dạng và nhiều khâu của quá trình gia công. Sự đa dạng này phản ánh nỗ lực của các nhà nghiên cứu nhằm tối ưu hóa hiệu ứng rung siêu âm cho từng ứng dụng cụ thể, từ vi gia công chính xác đến tạo bề mặt chức năng, từ gia công lỗ sâu đến gia công vật liệu đặc biệt. Xu hướng hiện nay là phát triển các hệ thống rung siêu âm thông minh - có thể điều chỉnh hướng rung, tần số, biên độ theo thời gian thực dựa trên phản hồi quá trình, nhằm đạt hiệu quả tối ưu nhất cho mọi điều kiện gia công.

Trong hệ thống thí nghiệm có hỗ trợ rung siêu âm, rung dọc trục được lựa chọn do khả năng tác động trực tiếp lên khe hở phóng điện, tạo chu kỳ mở–đóng ổn định và hạn chế ngắn mạch. Chuyển động dao động theo hướng trục đồng thời thúc đẩy dòng chảy điện môi, cải thiện đáng kể khả năng thoát phoi trong các lỗ sâu. Nhờ đó, tốc độ bóc tách vật liệu được nâng cao, độ mòn điện cực giảm và chất lượng bề mặt của chi tiết gia công được cải thiện. Hơn nữa, rung dọc trục dễ dàng tích hợp vào cơ cấu dịch chuyển theo trục z của máy *EDM*, đảm bảo tính chính xác và ổn định trong quá trình gia công.

Rung siêu âm được truyền trực tiếp vào phôi thép 90CrSi thông qua đầu khuếch đại (*horn*) gắn trên trục z của máy *EDM*. Việc lựa chọn truyền rung vào phôi thay vì điện cực xuất phát từ đặc tính truyền âm của graphite, vốn thấp hơn đáng kể

so với thép. Cụ thể, vận tốc truyền âm trong graphite chỉ đạt khoảng $2\div 3,6$ km/s so với $5,9\div 6,0$ km/s của thép, tương đương khoảng $0,4\div 0,6$ lần. Do đặc tính truyền âm thấp và dễ vỡ, điện cực graphite không được truyền rung siêu âm trong quá trình thí nghiệm. Để đảm bảo an toàn và ổn định, điện cực được gá cố định trên bàn máy EDM. Cách bố trí này giúp duy trì điều kiện phóng điện ổn định trong suốt quá trình gia công.

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

Trên thế giới, công nghệ EDM trợ giúp rung động siêu âm đã thu hút sự quan tâm lớn của giới nghiên cứu trong khoảng hơn hai thập kỷ trở lại đây. Nhiều hướng nghiên cứu phong phú đã được triển khai, từ nghiên cứu cơ bản về cơ chế quá trình cho đến phát triển các ứng dụng cụ thể, phản ánh tính hiệu quả và tiềm năng rộng mở của UV-EDM trong sản xuất công nghiệp. Dưới đây là tổng quan những thành tựu và xu hướng chính:

1.3.1 Giai đoạn khởi đầu

Việc áp dụng rung động siêu âm vào gia công thực ra có lịch sử lâu đời, ngay từ cuối những năm 1920, các thí nghiệm khoan kính bằng dao động siêu âm đã được Wood và Loomis thực hiện ở Mỹ [36]. Tuy nhiên, phải đến giữa thế kỷ 20, công nghệ siêu âm mới bắt đầu được đưa vào quá trình EDM. Năm 1986, Murti và cộng sự là những người tiên phong nghiên cứu ảnh hưởng của bức xạ siêu âm trong khe hở EDM; họ quan sát hình thái mảnh phoi bằng SEM và phát hiện phần lớn phoi có dạng cầu, rung siêu âm làm tăng độ tròn của phoi và tốc độ va chạm của chúng [36].

Tiếp đó, những năm 1990 chứng kiến các nỗ lực đầu tiên nhằm đồng bộ hóa rung siêu âm với xung phóng điện, tiêu biểu là nghiên cứu của Kremer và cộng sự (1991) [34] như đã đề cập, cho thấy triển vọng cải thiện ổn định gia công. Tuy số lượng công trình thời kỳ này chưa nhiều, nhưng chúng đặt nền móng cho các nghiên cứu thịnh hành sau này.

1.3.2 Tăng cường hiệu năng và chất lượng gia công

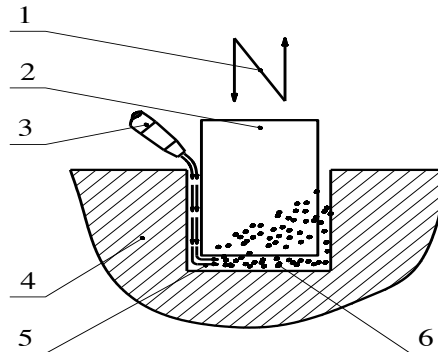
Bước sang những năm 2000-2010, nghiên cứu UV-EDM tập trung mạnh vào việc định lượng hiệu quả của siêu âm đối với các chỉ tiêu gia công (MRR , TWR , độ nhám, độ chính xác kích thước,...). Nhiều thí nghiệm so sánh giữa EDM thường và EDM có siêu âm đã được thực hiện trên các vật liệu và hình dạng gia công khác nhau. Kết quả nhất quán cho thấy UV-EDM vượt trội hơn EDM thường ở hầu hết các chỉ tiêu. Chẳng hạn, M. Shabgard và cộng sự (2011) [1] đã thực hiện nghiên cứu công phu trên thép hàn FW4: kết quả thực nghiệm cho thấy ở vùng thông số xung ngắn, MRR của UV-EDM cao gấp ~ 4 lần EDM thường và TWR thấp hơn. Tuy nhiên các tác giả lưu ý ở xung dài hiệu ứng đảo chiều (do rung siêu âm có thể gây xáo trộn quá

mức hồ quang ở xung dài [1]. Nghiên cứu này cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tối ưu hóa thông số khi áp dụng siêu âm - hiệu quả đạt được phụ thuộc nhiều vào chế độ xung điện. M. M. Sundaram và cộng sự (2008) [51] đã thiết kế thực nghiệm Taguchi để nghiên cứu sự kết hợp tối ưu của các thông số quy trình nhằm tối đa hóa tốc độ loại bỏ vật liệu và giảm thiểu mài mòn dụng cụ cho *micro-EDM* có siêu âm. Kết quả cho thấy tần số và biên độ rung ảnh hưởng mạnh đến *MRR* và thời gian gia công có vai trò quan trọng đến độ mòn điện cực.

Những kết quả này thúc đẩy nhiều nghiên cứu tối ưu hóa khác trong thập kỷ 2010, như của P. Singh và cộng sự (2018) [50] trên hợp kim titan, J. Xu và cộng sự (2024) [60] trên hợp kim Ti-6Al-4V, cả hai đều xây dựng thành công mô hình tối ưu hoá đa mục tiêu để tối ưu hóa quá trình *micro-EDM* có siêu âm (đồng thời tối ưu *MRR*, độ nhám, độ chính xác kích thước).

1.3.3 Cơ chế quá trình và mô phỏng

Vấn đề loại bỏ mảnh vụn (debris) trong vùng gia công *EDM* đặc biệt quan trọng đối với việc gia công các lỗ sâu hoặc khe hẹp, nơi mà mảnh vật liệu sau ăn mòn khó thoát ra ngoài. Sự tích tụ mảnh vụn gây cản trở phóng tia lửa điện ổn định, dẫn đến hiện tượng phóng lại (secondary discharge), ngắn mạch, làm giảm *MRR* và gây sai lệch hình dạng lỗ (hiện tượng côn).



Hình 1.10 Quá trình chuyển động của phoi UV-EDM trong gia công lỗ [37]

1. Rung siêu âm
2. Điện cực
3. Cửa cấp dung dịch điện môi
4. Chi tiết gia công
5. Dòng chảy điện môi trong khe hở phóng điện
6. Mặt gia công (Phoi)

Trong gia công xung điện có trợ giúp rung siêu âm, dao động siêu âm của điện cực làm tăng cường hiệu ứng xâm thực và tạo ra chênh lệch áp suất trong khe hở phóng điện, qua đó thúc đẩy dòng chảy chất điện môi. Nhờ sự gia tăng vận tốc và nhiều dòng chảy, mặt gia công được vận chuyển hiệu quả từ khe hở đáy và khe

hở bên ra ngoài vùng gia công (Hình 1.10). Cơ chế này góp phần cải thiện đáng kể khả năng loại bỏ mạt và nâng cao tính ổn định của quá trình gia công lỗ nhỏ [37].

Nhiều nghiên cứu đã tập trung giải quyết vấn đề này bằng cách ứng dụng rung động siêu âm để cải thiện quá trình thoát mảnh vụn. Wang và cộng sự (2025) đã nghiên cứu gia công lỗ sâu bằng *EDM* có hỗ trợ rung siêu âm kết hợp phương dọc và xoắn, kết quả cho thấy dòng chảy mảnh vụn trong lỗ được tăng cường và độ côn của lỗ giảm đi rõ rệt so với *EDM* thông thường [38]. Tương tự, Zhang và cộng sự (2024) đã phát triển mô hình dòng chảy trong khe hẹp của vi lỗ khoan *EDM* và chỉ ra cơ chế mà rung động siêu âm (dạng kết hợp dọc–xoắn) giúp mảnh vụn di chuyển liên tục ra khỏi vùng gia công, nhờ đó hạn chế được tích tụ mảnh và ổn định quá trình khoan lỗ sâu bằng *EDM* [61]. Gần đây, Hou và Bai (2023) đề xuất một phương pháp *EDM* vi mô hỗ trợ rung siêu âm không gian 3 chiều độc đáo, cho phép nâng cao hơn nữa hiệu quả loại bỏ mảnh vụn trong gia công các lỗ vi mô, cải thiện độ ổn định khi gia công các chi tiết có tỷ lệ chiều sâu/đường kính lớn [49]. Song song với đó, các nhà nghiên cứu cũng đi sâu vào quan sát và phân tích hiện tượng bong bóng và sủi cavitation trong *EDM* dưới tác động của siêu âm nhằm hiểu rõ hơn vai trò của chúng đối với việc đẩy mảnh vụn. Chenxue và cộng sự (2022) đã sử dụng camera tốc độ cao để quan sát hành vi của bong bóng khí trong quá trình *EDM* với rung động siêu âm, xác nhận rằng các bong bóng hình thành và vỡ nhờ siêu âm tạo ra vi dòng chảy mạnh giúp cuốn trôi mảnh vụn hiệu quả hơn, đồng thời thúc đẩy trao đổi điện môi liên tục trong khe hở [62]. Tác động của hiện tượng cavitation do siêu âm cũng được Wang và cộng sự (2023) nghiên cứu, kết quả chỉ ra cavitation ảnh hưởng đến cơ chế hình thành bề mặt trong *EDM*: các vi dòng chảy và sóng xung kích sinh ra từ bong bóng cavitation có thể làm bong lớp bám dính và sản phẩm phụ trên bề mặt gia công, góp phần tạo bề mặt sạch hơn và giảm nhám [46]. Những cải tiến trong việc loại bỏ mảnh vụn nhờ rung động siêu âm nêu trên trực tiếp nâng cao năng suất gia công (tăng *MRR*) và độ chính xác hình học (như giảm độ côn, độ lệch) cho quá trình *EDM* lỗ sâu, lỗ vi mô.

Trong quá trình *EDM* có hỗ trợ rung động siêu âm (*UV-EDM*), dao động cơ học tần số cao được truyền vào điện cực và môi trường điện môi trong khe phóng điện, làm xuất hiện các vùng xoáy cục bộ tập trung quanh mép điện cực. Sự dao động này gây ra sự biến thiên mạnh theo thời gian và không gian của vận tốc cũng như áp suất trong khe xả, phá vỡ trạng thái dòng chảy tầng vốn đặc trưng cho *EDM* truyền thống. Do đó, dòng chảy điện môi trong *UV-EDM* trở nên rối hơn đáng kể, với mức độ hỗn loạn cao và sự phân bố vận tốc–áp suất không đồng đều trong toàn bộ vùng phóng điện [63].

Dòng chảy rối và các xoáy cục bộ hình thành trong *UV-EDM* có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của quá trình gia công. Trước hết, sự khuấy trộn mạnh của điện môi giúp tăng cường khả năng cuốn và loại bỏ vụn phôi cũng như vật liệu nóng chảy ra khỏi khe phóng điện, qua đó duy trì điều kiện phóng điện ổn định và hạn chế hiện tượng phóng điện ngắn mạch hoặc phóng điện bất thường. Đồng thời, sự biến thiên lớn của vận tốc dòng chảy cải thiện quá trình trao đổi nhiệt, giúp làm mát hiệu quả bề mặt phôi và điện cực, giảm tích tụ nhiệt cục bộ trong vùng gia công. Trong [61] đã xây dựng mô hình trường dòng trong lỗ siêu nhỏ, so sánh điện cực quay, rung dọc và rung dọc-xoắn; kết quả cho thấy điện cực rung siêu âm làm tăng đáng kể vận tốc dòng và thay đổi rõ mô hình trường dòng trong lỗ, qua đó nâng cao hiệu quả cuốn mát.

Bên cạnh năng suất, chất lượng bề mặt sau *EDM* là một tiêu chí quan trọng, đặc biệt đối với các chi tiết khuôn mẫu hoặc bề mặt chức năng yêu cầu độ nhẵn cao. Nhiều giải pháp đã được đề xuất để cải thiện độ nhám bề mặt (*Ra*) và tính chất lớp bề mặt trong *EDM* mà không làm giảm đáng kể tốc độ gia công. Việc ứng dụng rung động siêu âm một mặt giúp giảm bớt nhám bề mặt do quá trình phóng điện ổn định hơn và ít tạo điểm phóng tập trung, mặt khác còn giảm thiểu chiều dày tầng ảnh hưởng nhiệt (recast layer) nhờ bong bóng cavitation liên tục “rửa trôi” bề mặt vừa gia công [46]. Li và cộng sự (2022) đã nghiên cứu một phương pháp *micro-EDM* mới sử dụng điện cực rung siêu âm theo quỹ đạo tròn 2D (*UCV*) và ghi nhận chất lượng bề mặt vi lỗ được cải thiện đáng kể: độ nhám giảm hơn 50% so với phương pháp *EDM* truyền thống, đồng thời giảm thiểu biến dạng nhiệt và vết nứt tế vi trên bề mặt [48]. Trước đó, Li và cộng sự (2020) cũng cho thấy điện cực rung theo quỹ đạo tròn giúp nâng cao đáng kể tính năng gia công vi lỗ, gia công được các lỗ đường kính rất nhỏ với độ đồng đều cao và bề mặt lỗ ít khuyết tật [47].

Ngoài siêu âm, công nghệ *EDM* lai (*hybrid*) kết hợp các biện pháp hỗ trợ khác cũng được áp dụng nhằm nâng cao chất lượng bề mặt. Lin và cộng sự (2016) đã thử nghiệm quy trình *EDM* trong môi trường khí (thay vì dung dịch chất điện môi lỏng) kết hợp rung siêu âm và tia nước có hạt mài (*AJM*), kết quả là bề mặt gia công có độ nhám bề mặt (*Ra*) tốt hơn do giảm sự hình thành lớp bám cứng và muội than [64]. Thêm vào đó, việc pha bột dẫn điện vào dung dịch điện môi (*PMEDM*) đã được chứng minh là có lợi cho chất lượng bề mặt do bột dẫn giúp phân tán năng lượng phóng đều hơn. Rajeswari và Shunmugam (2020) khi nghiên cứu chế độ đánh bóng bằng *EDM* (*finishing EDM*) đã kết luận rằng kết hợp rung siêu âm với bổ sung bột vào điện môi cho kết quả bề mặt mịn hơn hẳn so với *EDM* thường, do mật độ năng lượng phân bố đồng đều và giảm hiện tượng phóng điện tập trung [65]. Tương tự, Han và cộng sự (2024) khi gia công gốm TiN bằng *EDM* đã ứng dụng đồng thời rung siêu âm và bột

trộn trong dung dịch, nhận thấy độ nhám bề mặt giảm, ít vi nứt hơn, trong khi MRR tăng nhờ sự kết hợp này giúp cải thiện hình thức loại bỏ vật liệu trên vật liệu khó gia công [55]. Những kết quả này cho thấy tiềm năng lớn của các phương pháp hỗ trợ (siêu âm, thêm bột, thay đổi môi trường điện môi, v.v.) trong việc nâng cao chất lượng bề mặt mà không đánh đổi quá nhiều năng suất.

Song song với thử nghiệm thực nghiệm, các nhà khoa học cũng nỗ lực nghiên cứu cơ bản cơ chế bóc vật liệu và hình thành bề mặt dưới tác dụng của siêu âm. Yan Wang và cộng sự (2020) [66] phân tích cơ chế loại bỏ vật liệu và tạo bề mặt trong $UV-EDM$ thông qua mô phỏng nhiệt - dòng chảy và thực nghiệm đối chứng. Họ chỉ ra rằng rung siêu âm tạo ra sự giao thoa năng lượng: năng lượng phóng điện được phân bố lại bởi năng lượng dao động, làm giảm mật độ năng lượng đỉnh trên bề mặt phôi, dẫn đến bề mặt ít nứt hơn. Y. Wang và cộng sự (2023) [46] đi sâu vào ảnh hưởng của xâm thực (*cavitation*) do siêu âm trong EDM , phát hiện quá trình sục bong bóng do xâm thực có thể làm bong các hạt hợp kim tái bám trên bề mặt phôi, góp phần làm sạch bề mặt sau mỗi xung phóng điện. Mô phỏng động lực bong bóng trong trường siêu âm cho thấy ở tần số ~ 25 kHz, bong bóng hình thành dày đặc và sục vỡ liên tục, tạo vi dòng chảy đánh bật vụn bám trên bề mặt phôi. Về mô hình hóa, J. Singh và cộng sự (2020) [67] xây dựng mô hình phần tử hữu hạn (FEM) mô phỏng rung phôi trong EDM , tính toán phân bố áp lực chất lỏng và ứng suất trong phôi khi rung. Kết quả mô phỏng tương đồng với thực nghiệm, giúp lý giải tại sao rung phôi có thể tăng MRR nhưng nếu biên độ rung quá lớn sẽ gây biến dạng sai số gia công. M.T. Shervani-Tabar và cộng sự (2007) [35] thậm chí mô phỏng cả trường hợp rung dao động ở tần số cực cao và đề xuất giới hạn biên độ tối ưu để tránh “phá” cột hồ quang. Các nghiên cứu cơ bản này đã làm sáng tỏ nhiều khía cạnh vật lý của $UV-EDM$, tạo nền tảng cho thiết kế hệ thống và điều khiển quá trình sau này.

Cơ chế chính được chỉ ra là nhờ rung động siêu âm, dịch điện môi trong khe hở gia công được khuấy động mạnh hơn, giúp đẩy mảnh vụn ra khỏi vùng gia công nhanh hơn và cải thiện khả năng thay mới điện môi. Điều này dẫn đến hồ quang phóng ổn định hơn, giảm hiện tượng phóng điện bất thường và ngăn ngừa ngắn mạch do tích tụ mảnh vụn [34, 35]. Các thực nghiệm sau đó cũng khẳng định rung siêu âm có thể làm tăng MRR và giảm hao mòn điện cực, đồng thời cải thiện độ ổn định của quá trình phóng tia lửa điện [68]. Hirao và cộng sự (2018) quan sát thấy một số đặc tính EDM được cải thiện khi áp dụng rung động siêu âm lên điện cực, như giảm thời gian gia công và tăng độ chính xác kích thước [68]. Ngoài ra, biên độ và tần số rung động siêu âm được xác định là các thông số ảnh hưởng mạnh đến hiệu quả quá trình: nghiên cứu của Zhang và cộng sự (2022) cho thấy khi tăng biên độ rung, thời gian

gia công *micro-hole* có thể rút ngắn đáng kể nhờ tăng cường khả năng loại bỏ mảnh vụn, tuy nhiên hiệu quả đạt được sẽ bão hòa nếu biên độ vượt quá một ngưỡng nhất định [69]. Như vậy, việc tích hợp rung động siêu âm vào EDM đã được chứng minh là một giải pháp hữu hiệu để nâng cao đồng thời năng suất và chất lượng gia công.

1.3.4 Phát triển các cấu hình và ứng dụng mới

Những năm gần đây, thế giới chứng kiến nhiều ý tưởng và cấu hình sáng tạo trong *UV-EDM* nhằm giải quyết các bài toán khó. Z. Yin và cộng sự (2023) [45] giới thiệu cấu trúc điện cực *LTV* (như đã nêu), cho phép khoan vi lỗ sâu hạn chế độ côn. P. Zhang và cộng sự (2022) [69] khảo sát ảnh hưởng của biên độ siêu âm lên hiệu suất khoan vi lỗ, khuyến cáo biên độ tối ưu để tránh hiện tượng “rỗ” do rung quá mạnh. Y. Zhang & B. Xie (2021) [70] tập trung vào độ đồng đều đường kính của ma trận lỗ khi khoan EDM có siêu âm, kết luận rung siêu âm giúp các lỗ phân bố đều và kích thước gần nhau hơn do điều kiện phóng điện ít dao động giữa các lỗ. Một số nghiên cứu đã kết hợp *UV-EDM* với các công nghệ khác: như Lin và cộng sự (2016) [64] kết hợp EDM trong khí với rung siêu âm và tia hạt mài (*AJM*) để gia công lỗ, cho thấy thúc đẩy hiệu quả gia công và chất lượng bề mặt. Hou và cộng sự (2023) [49] sử dụng phân tích kết hợp nhiệt - dòng chảy để nghiên cứu cơ chế xói mòn *micro-EDM* có siêu âm, phục vụ gia công chính xác linh kiện vi cơ. Prihandana và cộng sự (2009) [71] áp dụng rung siêu âm cho quá trình *micro-EDM* có bột nano và sử dụng phương pháp thiết kế ma trận thí nghiệm *Taguchi*, phát hiện rung siêu âm giúp làm ổn định phân bố bột trong khe hở, nâng cao khả năng tạo hợp kim bề mặt. J. Jafferson và cộng sự (2014) [72] thậm chí kết hợp cùng lúc rung siêu âm và từ trường trong *micro-EDM* phay, cho vật liệu phi từ tính, báo cáo rằng hai tác động này hỗ trợ lẫn nhau làm giảm đáng kể độ nhám và sai số hình học.

1.4 Tình hình nghiên cứu về EDM trợ giúp siêu âm ở Việt Nam

Tại Việt Nam, nhiều công trình đã tập trung nghiên cứu tối ưu hóa quá trình gia công tia lửa điện (*EDM*) và EDM có trộn bột (*PMEDM*) nhằm nâng cao hiệu quả và chất lượng bề mặt. Nguyễn Văn Đức [73] đã ứng dụng các phương pháp tối ưu hóa đơn và đa mục tiêu trong EDM, cùng với kết hợp phương pháp *Taguchi* với *AHP-Deng's* để xác định chế độ công nghệ tối ưu khi sử dụng điện cực đồng. Nghiên cứu này không chỉ góp phần nâng cao năng suất bóc tách vật liệu mà còn hướng đến giảm mòn điện cực và cải thiện độ nhám bề mặt.

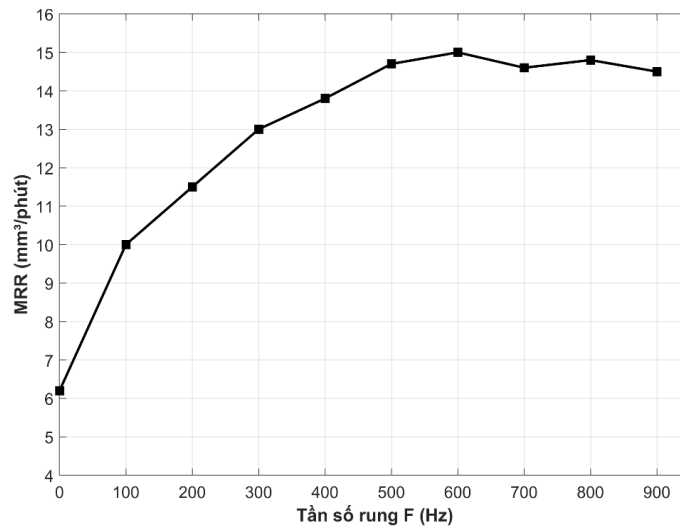
Lê Thị Phương Thảo (2025) và cộng sự đã tiến hành nghiên cứu nhằm tối ưu hóa quá trình gia công bằng tia lửa điện (*EDM*) đối với các chi tiết có bề mặt hình trụ chế tạo từ thép 90CrSi, sử dụng điện cực than chì. Điểm mới của công trình nằm ở việc xác định tập hợp thông số EDM tối ưu cho gia công bề mặt trụ khi áp dụng ba

loại điện cực than chì khác nhau, bao gồm HK0, HK15 và HK20. Để giải quyết bài toán tối ưu đa mục tiêu, các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (*MCDM*) như *MABAC*, *MOORA* và *MAIRCA* đã được sử dụng. Bên cạnh đó, phương pháp Entropy được áp dụng nhằm xác định trọng số của các tiêu chí đánh giá. Nghiên cứu tập trung phân tích ba chỉ tiêu công nghệ chủ yếu, gồm độ nhám bề mặt (*Ra*), tỷ lệ mòn điện cực (*EWR*) và tốc độ bóc vật liệu (*MRR*) [74].

Trong lĩnh vực *PMEDM*, Bành Tiến Long (2015) và cộng sự [75] đã thực hiện nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về việc trộn bột titan vào dung dịch điện môi khi gia công thép SKD61. Kết quả thu được cho thấy độ nhám bề mặt *Ra* giảm rõ rệt, đồng thời độ cứng tế vi lớp bề mặt tăng lên so với khi không sử dụng bột trộn. Tiếp đó, Nguyễn Mạnh Cường (2023) và cộng sự [76] đã khảo sát ảnh hưởng kết hợp của thông số xung, vật liệu điện cực và nồng độ bột nano SiC trong quá trình *PMEDM* trên vật liệu khuôn. Kết quả nghiên cứu ghi nhận mức tăng đáng kể về năng suất bóc tách vật liệu (*MRR*), đồng thời lượng mòn điện cực (*EWR*), độ nhám (*Ra*) giảm rõ rệt và độ cứng bề mặt (*HV*) được cải thiện đáng kể. Đây là những tiền đề quan trọng cho việc tích hợp các công nghệ hỗ trợ như rung động siêu âm vào quá trình *EDM*.

Ngoài ra, một số nghiên cứu đã tập trung vào gia công các chi tiết có hình dạng đặc biệt. Trần Thị Hồng và cộng sự [27] đã thực hiện nghiên cứu về quá trình gia công bề mặt trụ ngoài định hình bằng *EDM* cho vật liệu thép 90CrSi qua tô, sử dụng dung dịch điện môi có trộn bột nano SiC cho thấy các yếu tố như cường độ dòng điện (I_p) và điện áp (*SV*) có ảnh hưởng mạnh nhất đến chỉ tiêu đầu ra, đặc biệt trong điều kiện có bột nano. Hoàng Xuân Tú và cộng sự [77] đã khảo sát ảnh hưởng của bột SiC trong dung dịch điện môi khi gia công chi tiết trụ vuông bằng thép SKD11. Kết quả cho thấy việc trộn bột SiC giúp cải thiện đáng kể tốc độ mòn điện cực và độ nhám bề mặt – những chỉ tiêu vốn được cải thiện rõ hơn nếu có bổ sung rung động siêu âm.

Tuy nhiên, có thể thấy rằng phần lớn các nghiên cứu trên đều tập trung vào quá trình *EDM* [73] hoặc *PMEDM* [24, 75], mà chưa đề cập trực tiếp đến việc ứng dụng rung động trong quá trình gia công. Cho đến thời điểm hiện tại, các nghiên cứu về ứng dụng rung động cơ học trong *EDM* tại Việt Nam mới chỉ xuất hiện trong một số công trình sau. Lê Quang Dũng và cộng sự [78] là nhóm đầu tiên công bố nghiên cứu ảnh hưởng của rung động tần số thấp (*F*) tích hợp vào phôi thép SKD61 trong quá trình *PMEDM* sử dụng bột titan. Kết quả cho thấy rung động cơ học có ảnh hưởng tích cực rõ rệt đến hiệu quả gia công: *MRR* tăng mạnh (Hình 1.11), độ nhám bề mặt giảm, và đặc biệt lượng mòn điện cực (*EWR*) giảm tới 70,2%. Nghiên cứu này khẳng định vai trò quan trọng của rung động trong việc cải thiện điều kiện hồ quang, giảm đoản mạch và nâng cao độ ổn định quá trình *EDM* khi trộn bột.



Hình 1.11 Ảnh hưởng của rung động đến MRR [78]

Đáng chú ý, nghiên cứu của V.T. Dinh [79] gần đây đã đánh dấu bước tiến mới trong lĩnh vực EDM có trợ giúp siêu âm tại Việt Nam. Nghiên cứu tập trung vào thiết kế và thử nghiệm *horn* siêu âm cho quá trình UV-EDM gia công bề mặt trụ ngoài với điện cực đồng có sự trợ giúp của rung động siêu âm tác dụng lên điện cực. Việc thiết kế *horn* được chia thành hai giai đoạn: mô phỏng lý thuyết và xác minh thực nghiệm, nhằm xác định chiều dài tối ưu để đạt được tốc độ loại bỏ vật liệu lớn nhất và đảm bảo độ nhám bề mặt phù hợp [11]. Kết quả nghiên cứu cho thấy *horn* siêu âm thiết kế đã giúp cải thiện MRR lên đến 119,51%, trong khi giá trị độ nhám bề mặt (Ra) vẫn giữ ở mức tương đương so với trường hợp không sử dụng siêu âm. Đây là công bố đầu tiên tại Việt Nam nghiên cứu toàn diện về ứng dụng rung động siêu âm trong EDM gia công bề mặt hình trụ – một hướng đi đầy tiềm năng trong lĩnh vực gia công chính xác.

Trần Thị Phương Thảo (2025) và cộng sự đã tiến hành thực hiện gia công xung điện bề mặt trụ ngoài với điện cực đồng với rung động siêu âm được áp dụng lên điện cực, giúp tăng năng suất bóc tách vật liệu MRR đối với thép 90CrSi lên 35,5%. Trong khi vẫn duy trì giá trị độ nhám bề mặt Ra tương tự như giá trị đạt được trong quá trình EDM không có rung siêu âm [79].

Mặc dù các nghiên cứu về UV-EDM tại Việt Nam còn đang ở giai đoạn sơ khai, nhưng đã có những dấu hiệu khởi sắc. Việc kết hợp giữa các kỹ thuật như PMEDM, rung động cơ học và đặc biệt là rung động siêu âm đang mở ra những cơ hội lớn trong việc nâng cao hiệu suất và chất lượng của gia công EDM trong nước. Tại Việt Nam, mặc dù một số công trình đã bước đầu khai thác các yếu tố hỗ trợ như trộn bột và rung cơ học trong EDM, nhưng nghiên cứu chuyên sâu và toàn diện về UV-EDM vẫn còn rất hạn chế. Đặc biệt, cho đến nay, chưa có công bố nào tập trung

nguyên cứu *UV-EDM* để gia công bề mặt trụ ngoài thép hợp kim dụng cụ 90CrSi bằng điện cực graphite - một loại vật liệu và biên dạng gia công có tính ứng dụng cao trong chế tạo khuôn mẫu và chi tiết cơ khí chính xác.

Do đó, nghiên cứu được triển khai trong khuôn khổ luận án không chỉ mang tính tiên phong tại Việt Nam trong việc ứng dụng rung động siêu âm vào quá trình gia công *EDM* đối với đối tượng vật liệu đặc thù này, mà còn thể hiện tính cấp thiết rõ rệt cả về phương diện khoa học lẫn giá trị thực tiễn. Tính mới và định hướng tiên phong của đề tài được thể hiện ở các nội dung:

- Đề tài tích hợp công nghệ gia công xung điện có trợ giúp rung động siêu âm (*UV-EDM*) vào quá trình gia công bề mặt trụ ngoài có biên dạng đặc trưng, qua đó góp phần khắc phục các hạn chế của *EDM* truyền thống, điển hình là hiện tượng tích tụ vật gia công và sự mất ổn định hồ quang.
- Trong nghiên cứu này, điện cực graphite — vật liệu có độ dẫn điện tốt, khả năng tạo hình cao nhưng có xu hướng mòn lớn — được lựa chọn làm đối tượng khảo sát nhằm đánh giá hiệu quả của rung động siêu âm trong việc giảm tốc độ mòn điện cực (*TWR*).
- Luận án tập trung xây dựng và triển khai tối ưu hóa đơn mục tiêu và đa mục tiêu đối với các chỉ tiêu công nghệ chủ yếu, bao gồm năng suất bóc tách vật liệu, độ nhám bề mặt và tốc độ mòn điện cực, qua đó đáp ứng yêu cầu của sản xuất hiện đại.

Dựa trên nền tảng cơ sở lý luận được xây dựng chặt chẽ, đồng thời làm rõ khoảng trống nghiên cứu và định hướng ứng dụng thực tiễn cụ thể, đề tài thể hiện khả năng đóng góp thiết thực cho sự phát triển công nghệ *UV-EDM* trong bối cảnh triển khai tại Việt Nam. Những kết quả đạt được được kỳ vọng sẽ định hình các hướng nghiên cứu mới, tạo cơ sở cho các công trình tiếp theo và mở rộng tiềm năng ứng dụng trong lĩnh vực gia công tiên tiến.

1.5 Tổng quan xu hướng

Nhìn chung, tình hình nghiên cứu *UV-EDM* trên thế giới rất sôi động với sự tham gia của nhiều nhóm nghiên cứu từ các quốc gia: Trung Quốc, Ấn Độ, Nhật Bản, Iran, v.v. (dựa theo danh sách tài liệu tham khảo). Các kết quả đồng thuận ở mức độ định tính rằng rung động siêu âm luôn mang lại cải thiện cho *EDM*. Song, cũng có những khám phá chi tiết hơn: ví dụ, Rajeswari và Shunmugam (2020) [65] tìm hiểu ảnh hưởng của chế độ xung (đơn xung, chuỗi xung) đến hiệu ứng rung có trộn bột, cho thấy ở chế độ chuỗi xung ngắn, rung siêu âm và bột kết hợp cho bề mặt tốt nhất. M.R. Shabgard và cộng sự (2018) [43] thực hiện cả thực nghiệm và mô phỏng, đưa ra kết luận rằng rung dụng cụ làm giảm hẳn số xung dạng hồ quang (arcing) trong tổng số

xung, do đó bề mặt ít bị cháy. Y. Wang và cộng sự (2023) [46] lần đầu tiên định lượng được vai trò của xâm thực: họ đo đặc trực tiếp độ sâu hố lõm do bong bóng vỡ trên bề mặt phôi và chứng minh những hố lõm nhỏ này thực chất giúp bề mặt thoát ứng suất.

Một khía cạnh đáng chú ý là mở rộng ứng dụng *UV-EDM* sang các lĩnh vực liên ngành. Chẳng hạn, như đã trình bày, *UV-EDM* được dùng để tích hợp vật liệu (bạc, titan, composite) lên bề mặt tạo tính năng mới [44]. M. Li và cộng sự (2025) [80] sử dụng *UV-EDM* trong môi trường gần-khô với bột để tạo lớp bề mặt tăng cứng trên hợp kim Ti-6Al-4V, thu được lớp hợp kim hoá mịn và có độ cứng tăng ~20% so với nền. B. Chen và cộng sự (2024) [36] áp dụng *UV-EDM* rung ngang để khoan các lỗ siêu nhỏ trên chi tiết động cơ và nhận định hệ thống của họ “mở ra hướng mới có tiềm năng thị trường rộng” nhờ không làm ảnh hưởng kết cấu máy *EDM* tiêu chuẩn.

Tổng kết lại, trên bình diện thế giới, nghiên cứu về *EDM* có trợ giúp rung động siêu âm đã đạt được nhiều kết quả nổi bật: khẳng định chắc chắn hiệu quả vượt trội của công nghệ này so với *EDM* truyền thống, làm sáng tỏ các cơ chế vật lý liên quan, đồng thời phát triển đa dạng các phương pháp và ứng dụng mới như *micro-EDM*, *PMEDM*, *dry EDM* hoặc *EDM* lai. Tuy nhiên, vẫn còn những khoảng trống đáng kể cần tiếp tục được nghiên cứu chuyên sâu, chẳng hạn như: ảnh hưởng của rung siêu âm ở tần số rất cao (>40 kHz) hoặc rất thấp (~không liên tục) đến đặc tính gia công; thiết kế và điều khiển thông minh cho hệ thống *UV-EDM*; hoặc đánh giá hiệu quả của công nghệ này trên các đối tượng hình học đặc thù, điển hình như bề mặt trụ ngoài - vốn là biên dạng gia công ít được đề cập trong tài liệu quốc tế.



Hình 1.12 Chày dập thuốc viên định hình

Đặc biệt, cho đến nay, chưa có nghiên cứu nào công bố về *UV-EDM* để gia công bề mặt trụ ngoài của thép hợp kim dụng cụ 90CrSi bằng điện cực graphite. Đây là dạng chi tiết có ý nghĩa thực tiễn rất lớn trong ngành kỹ thuật và sản xuất công nghiệp, thường gặp trong các chày định hình để dập viên thuốc trong ngành dược

phẩm (Hình 1.12), chày đột lỗ định hình thép tấm, hoặc đột lỗ trên các tấm bằng các loại vật liệu khác nhau. Đặc tính bề mặt của những chi tiết này yêu cầu độ bóng cao, độ mòn thấp và hình học chính xác – những yêu cầu mà công nghệ EDM truyền thống khó đáp ứng đầy đủ, đặc biệt khi gia công thép đã qua nhiệt luyện như 90CrSi.

Chính vì vậy, hướng nghiên cứu của luận án này là hoàn toàn phù hợp và có tính cấp thiết cao. Đề tài không chỉ kế thừa nền tảng tri thức phong phú từ các nghiên cứu quốc tế về *UV-EDM*, mà còn bổ sung vào khoảng trống chưa được khai thác về đối tượng vật liệu, hình học chi tiết và điều kiện công nghệ. Những đóng góp từ đề tài sẽ có ý nghĩa quan trọng trong việc mở rộng ứng dụng công nghệ *UV-EDM* tại Việt Nam cũng như trên thế giới, đồng thời cung cấp thêm hiểu biết khoa học và giải pháp kỹ thuật cho lĩnh vực gia công chính xác hiện đại.

Kết luận Chương 1

Tổng quan các tài liệu nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả vượt trội của công nghệ *UV-EDM* trong lĩnh vực gia công chính xác vật liệu khó. Song, việc ứng dụng công nghệ này để gia công bề mặt trụ ngoài sử dụng điện cực graphite vẫn là một hướng nghiên cứu mới, đòi hỏi sự khảo sát và đánh giá thực nghiệm chuyên sâu.

Các nghiên cứu quốc tế đã chứng minh hiệu quả rõ rệt của rung siêu âm trong việc cải thiện năng suất bóc tách vật liệu, giảm mòn điện cực, nâng cao chất lượng bề mặt và tăng độ ổn định của quá trình phóng điện.

Chương này trình bày cơ sở lý thuyết của quá trình gia công xung điện có trợ giúp rung động siêu âm, làm rõ nguyên lý hoạt động của EDM và *UV-EDM*, đồng thời phân tích các ưu điểm của *UV-EDM* dựa trên nghiên cứu cơ chế bóc tách vật liệu và sự hình thành bề mặt dưới tác động của rung động siêu âm.

Việc ứng dụng rung động siêu âm trong các phương thức gia công tiên tiến đã mở rộng đáng kể phạm vi ứng dụng công nghệ, cho phép tối ưu hóa các thông số kỹ thuật và đáp ứng linh hoạt các yêu cầu sản xuất trong công nghiệp hiện đại.

Rung siêu âm góp phần phân tán năng lượng phóng điện, làm giảm mật độ năng lượng đỉnh và hạn chế nứt bề mặt. Quá trình xâm thực thủy khí tạo vi dòng chảy, hỗ trợ loại bỏ mạt tái bám và cải thiện điều kiện thủy động trong vùng gia công. Đồng thời, sự gia tăng vận tốc tương đối giữa điện cực và phôi giúp hạn chế phóng điện bất thường, qua đó tăng cường tính ổn định của quá trình.

Kết quả tổng hợp, phân tích các thông số cơ bản của quá trình EDM và các hình thức rung động siêu âm sử dụng trong gia công cơ khí cũng là cơ sở để xây dựng các phương án, hệ thống 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*

Trong nghiên cứu này, phương pháp thiết kế *Box-Behnken* (*Box-Behnken Design – BBD* hoặc *BBK*) thuộc nhóm phương pháp Bề mặt đáp ứng (*Response Surface Methodology – RSM*) được sử dụng để thiết lập ma trận thí nghiệm nhằm mô hình hóa và tối ưu hóa ba hàm mục tiêu riêng biệt: độ nhám bề mặt ($Ra - \mu\text{m}$), tốc độ bóc tách vật liệu ($MRR - \text{g/h}$) và tốc độ mòn điện cực theo phương đứng ($HWR - \text{mm/h}$).

Thiết kế *Box-Behnken* được lựa chọn nhờ khả năng tối ưu hóa số lượng thí nghiệm trong khi vẫn bảo đảm xây dựng được mô hình bậc hai với độ chính xác cao. Các điểm thí nghiệm được bố trí tại các mức trung gian của không gian khảo sát, giúp tránh sự xuất hiện của các tổ hợp điều kiện biên không cần thiết. Đồng thời, các thí nghiệm tại điểm tâm vừa hỗ trợ dự đoán giá trị tối ưu trong vùng lân cận trung tâm, vừa được lặp lại nhằm đánh giá mức độ biến thiên do sai số ngẫu nhiên. Nhờ đó, độ tin cậy và khả năng khái quát hóa của mô hình thực nghiệm được nâng cao đáng kể.

Năm thông số đầu vào được khảo sát trong nghiên cứu gồm:

- A (μm): Biên độ rung siêu âm – 3 mức
- T_{on} (μs): Thời gian phóng điện – 3 mức
- T_{off} (μs): Thời gian ngắt – 3 mức
- I_p (A): Dòng điện xung – 3 mức
- SV (V): Điện áp xung – 3 mức

Thiết kế *BBK* cho 5 biến với 3 mức mỗi biến tạo thành 46 thí nghiệm, bao gồm các tổ hợp điểm thiết kế và lặp lại tại tâm nhằm đánh giá sai số ngẫu nhiên. Bảng thiết kế chi tiết và dữ liệu thu thập được trình bày trong phần sau của chương.

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

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.1)$$

Trong đó: y là một trong ba đầu ra: Ra , MRR hoặc HWR

x_i là các biến đầu vào đã mã hóa

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ là hệ số tuyến tính, bậc hai và tương tác

ε là sai số ngẫu nhiên

Toàn bộ dữ liệu thí nghiệm từ thiết kế *BBK* sẽ được sử dụng để xây dựng mô hình và thực hiện tối ưu hóa trong các phần tiếp theo.

2.2 Phương pháp tối ưu hoá đơn mục tiêu và đa mục tiêu

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*, lựa chọn phương án tối ưu bằng phương pháp *AHP*.

2.3 Thiết kế hệ thống thí nghiệm

2.3.1 Vật liệu gia công 90CrSi

a) Thành phần hoá học của Thép 90CrSi

Thép 90CrSi là thép hợp kim có hàm lượng cacbon cao, loại thép hợp kim dụng cụ có tính thấm tôi tốt, hiện được sử dụng rất phổ biến. Trong trường hợp làm khuôn dập, khuôn ép, cối dập thuốc, dụng cụ cắt gọt ... một số bề mặt sử dụng thép 90CrSi khi đã tôi cứng. Nhờ tính tôi và thấm tôi tốt nên sau khi tôi, thép 90CrSi có thể làm nguội trong dầu và dụng cụ sau khi tôi ít bị cong vênh, biến dạng. Có sự phân bố cacbit đồng đều trên toàn tiết diện, điều này cho phép sử dụng nó để chế tạo dụng cụ có kích thước lớn, các dụng cụ có profin không mài lại sau nhiệt luyện, các dụng cụ gia công ren – đặc biệt là ren bước nhỏ. Do sự tổ hợp hợp lý các nguyên tố hợp kim (chủ yếu là silic, crom, mangan) và do sự phân bố đồng đều cacbit nên tính bền nóng của nó tăng đến 250°C.

Bảng 2.1 Thành phần hóa học của Thép 90CrSi (% khối lượng)

Mác vật liệu	Thành phần hóa học (%)										
	C	Si	Mn	P≤	S≤	Cr≤	Mo≤	Ni≤	V≤	W≤	Nguyên tố khác
90CrSi	0,85~ 0,95	1,2~ 1,6	0,3~ 0,6	0,03	0,03	0,95- 1,25	0,2	0,35	0,15	0,2	Cu≤0,3 Ti≤0,03

b) Đặc điểm về khả năng công nghệ của 90CrSi

Công dụng: Chế độ nhiệt luyện của vật liệu 90CrSi được thể hiện trong Bảng 2.2. Thép 90CrSi được sử dụng rộng rãi trong chế tạo dụng cụ cắt nguội và khuôn dập nguội nhờ độ cứng và khả năng chống mài mòn cao. Vật liệu đặc biệt phù hợp cho các chi tiết làm việc trong điều kiện ma sát và mài mòn lớn, nơi yêu cầu độ bền cạnh cắt và độ ổn định hình dạng cao. Làm dụng cụ nhỏ hình dạng phức tạp như mũi khoan, Tarô, bàn ren, lược ren, dao phay...

Tính cứng nóng tương đối khá: Si cùng Cr tăng tính cứng nóng tới 300°C, tốc độ cắt đạt được 10 m/phút. Ưu điểm của vật liệu 90CrSi là có giá thành rẻ và được dùng tương đối phổ biến. Nhược điểm đáng kể nhất của 90CrSi là dễ thoát cacbon khi nung do có thành phần Si, nên cần phải chú ý bảo vệ khi tôi. Thép được tôi ở khoảng nhiệt độ 840÷860°C trong dầu, ram ở khoảng nhiệt độ 50÷200°C, độ cứng đạt được từ 62÷64 HRC. 90CrSi có tính tôi và thấm tôi tốt, sau khi tôi có thể làm nguội trong dầu và dụng cụ sau khi tôi ít bị cong vênh, biến dạng. Đối với dụng cụ định hình mà profin không qua mài, điều quan trọng phải giữ cho kích thước không

đôi khi tôi như profin ren của taro, bàn ren tròn.

Bảng 2.2 Chế độ nhiệt luyện 90CrSi

Mác thép	Nhiệt độ ủ (°C)	Độ cứng sau ủ (HB)	Tôi (°C)	Làm nguội	Độ cứng sau tôi (HRC)	Ram (°C)	Độ cứng sau ram (HRC)
90CrSi	790~810	241~197	850~880	Dầu	65~61	150~200	65~63
						200~300	63~59
						300~400	59~54
						400~500	54~47
						500~600	47~39

90CrSi là thép hợp kim ít bị biến dạng. Thép 90CrSi đảm bảo độ cácbít đều đặn, nên được dùng để chế tạo dụng cụ có yếu tố cắt mỏng không những phân bố ở xa tâm như tarô mà phân bố ở gần tâm như bàn ren tròn. Do sự tổ hợp hợp lý các nguyên tố hợp kim (Si, Cr, Mn) và do sự phân bố đều tính bền nóng của thép 90CrSi tăng lên 250°C. Với đặc điểm như trên thép 90CrSi hoàn toàn phù hợp với việc thiết kế và điều kiện làm việc của tarô, bàn ren.

c) Vai trò của các nguyên tố hợp kim chính trong thép 90CrSi đối với cơ tính và chế độ nhiệt luyện

Cacbon: Trong thép, Cacbon là nguyên tố quan trọng nhất (không kể sắt). Tổ chức và tính chất của thép chủ yếu do Cacbon quyết định. Cacbon tồn tại trong thép dưới hai dạng: dung dịch rắn xen kẽ trong mạng tinh thể sắt và dạng liên kết trong hợp chất Fe₃C (Xementit). Các pha dung dịch rắn có độ dẻo cao, độ bền thấp trong khi pha xementit là pha cứng và giòn. Sự kết hợp pha này sẽ cho các tổ chức khác nhau của thép ứng với từng thành phần và trạng thái cụ thể. Khi hàm lượng cacbon tăng lên, độ bền và độ cứng tăng theo, độ dẻo, độ dai giảm đi. Độ bền tăng có cực đại vào khoảng 0,9%C. Một cách định lượng, cứ tăng 0,1% C, độ cứng tăng khoảng 20-25 HB, độ bền tăng khoảng 60÷80 MPa, độ dẫn dài tương đối và độ thắt tỷ đối giảm lần lượt là 2÷4% và 1÷5%, độ dai va đập giảm 200kJ/m².

Silic: Silic làm tăng rất mạnh độ cứng (độ bền) song cũng làm giảm mạnh độ dai (độ dẻo), đặc biệt khi thép chứa 2% Si hoặc 3,5% Mn có độ dai rất thấp (< 500kJ/m²) làm thép giòn không cho phép sử dụng. Do vậy mặc dù có lợi thế là rẻ hơn, khả năng hóa bền cao Silic chỉ được dùng với hàm lượng hạn chế 1÷2%.

Crôm: Crôm khi làm việc tăng độ cứng và làm tăng độ dai. Do vậy hợp kim hóa thép bằng Cr là rất tốt vì ngoài làm tăng độ thấm tôi, bản thân chúng nâng cao độ cứng, độ bền mà vẫn duy trì tốt độ dẻo, độ dai của ferit. Vì thép có độ thấm tôi cao thuộc nhóm hợp kim hóa Cr-Ni.

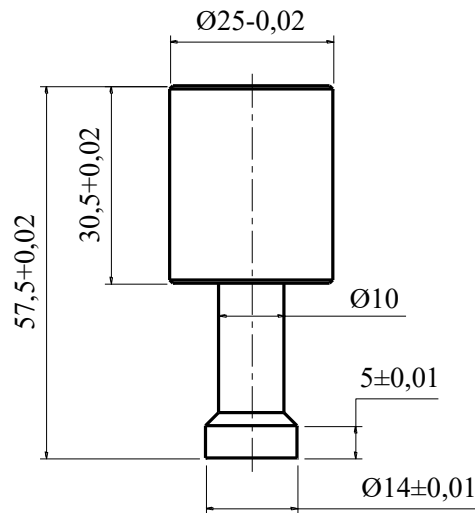
d) Sự tạo thành Cacbit

Silic: Silic không tạo thành cacbit. Si hoà tan trong nền ferit làm tăng độ bền của nền. Hệ số tăng độ thấm tôi của Si là 1,7 (loại trung bình). Si còn có tác dụng tăng tính ổn định Ram, nhưng không làm tăng tính giòn của thép. Si tăng khả năng chống oxy hóa thép ở nhiệt độ cao và tăng độ bền. Cùng với Mn (1,5-2%Si và 0,5-0,9%Mn) Si có tác dụng tăng giới hạn đàn hồi, ứng dụng để sản xuất lò xo.

Crôm: Cr có trong thép 90CrSi là yếu tố quan trọng tạo thành cacbit. Cr tạo cacbit phức tạp: Cr_7C_3 và $Cr_{23}C_6$, những cacbit này hoà tan vào austenit khi nhiệt độ cao hơn $900^{\circ}C$. Cr tăng đáng kể độ thấm tôi (hệ số 3,2). Crôm có tác dụng cải thiện tính chống ram và độ bền ở nhiệt độ cao, do đó tạo ra cacbit nhỏ mịn khi ram, có tác dụng hóa bền tiết pha, bù lại sự hóa mềm của mactenxit do độ giảm chính phương. Cuối cùng Cr đóng vai trò hàng đầu đối với độ bền chống mài mòn. Thép sau cùng tích (0,9÷1,1%C) mà có 0,5÷1,7%Cr được dùng rộng rãi để chế tạo bi và vòng bi các loại (kể cả trục lăn và trục cán).

e) Thông số hình học

Chi tiết gia công được lựa chọn dựa vào kích thước chày dập thuốc định hình dạng viên nén. Mặt trụ $\varnothing 25$ được sử dụng để gá đặt lên đầu máy EDM thông qua dụng cụ khuếch đại siêu âm (*Horn*) tương tự như vị trí gá đặt của nó tại các vị trí trên bàn xoay của máy dập thuốc (Hình 2.1).



Hình 2.1 Chi tiết gia công 90CrSi

2.3.2 Vật liệu điện cực graphite HK2

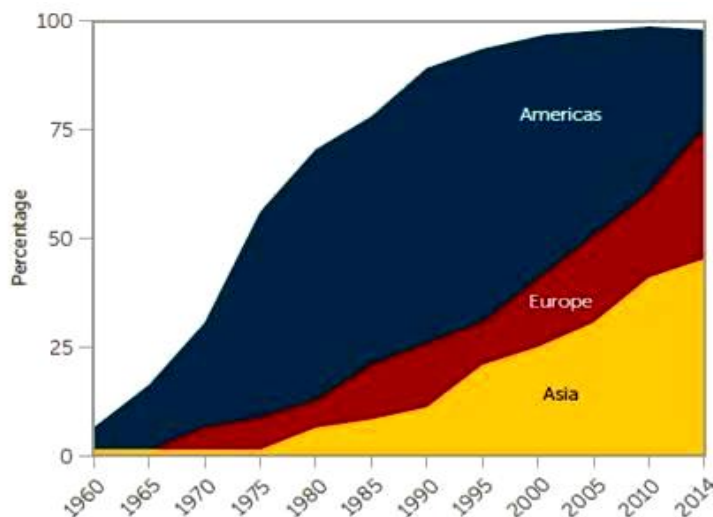
a) Đặc tính và ưu điểm của graphite

So với vật liệu đồng, vật liệu graphite có hệ số giãn nở nhiệt thấp hơn, nên sự biến dạng do tác động của nhiệt độ sẽ thấp hơn nhiều so với vật liệu đồng truyền thống. Graphite được tạo thành từ các hạt carbon trải qua quá trình than hóa. Theo Haley, khả năng gia công, *MRR*, *Ra* và *TWR* phụ thuộc đáng kể vào kích thước hạt, từ 0,015 đến 0,0001 mm – tương ứng độ hoàn thiện chất lượng bề mặt gia công thông thường đến chi tiết cực kỳ tinh xảo.

Bảng 2.3 Đặc tính của graphite và đồng

Thông số kỹ thuật	Graphite	Đồng
Khối lượng riêng (g/cm^3)	1,7 – 1,9	8,9
Độ giãn nở nhiệt ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	3,0 – 6,0	16,7
Nhiệt độ nóng chảy ($^\circ\text{C}$)	3600	1083
Điện trở suất ($\mu\Omega\text{m}$)	10 - 25	0,02

Tính phổ biến của Graphite rất rộng rãi và có tính gia công cao, dễ dàng tạo hình bất kỳ theo ý muốn mà không hình thành ba vĩa (Hình 2.2) [81]. Dễ dàng tạo hình graphite bằng các phương pháp gia công thông thường. Hơn nữa, theo Jerry Mercer việc sản xuất graphite dễ dàng đáp ứng linh hoạt theo đặc điểm tính chất gia công, từ đó tối ưu hoá được vật liệu sản xuất điện cực so với đồng. Graphite có khả năng xử lý mật độ dòng điện hiệu quả; graphite thực sự hoạt động rất tốt ở mật độ dòng điện cao ngay cả với hình dạng phức tạp. Vì lý do này, điện cực than chì cung cấp khả năng thiết kế nhiều chi tiết gia công phức tạp trên cùng một điện cực.



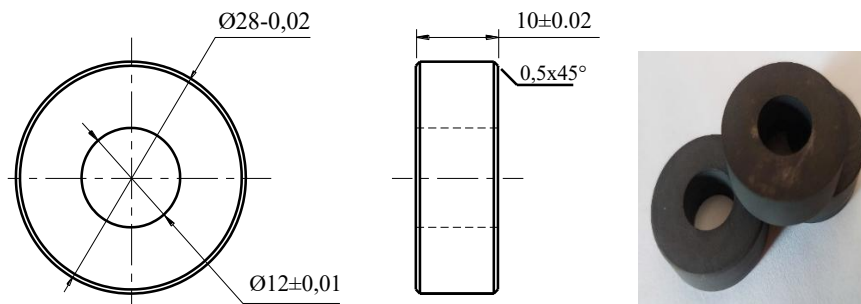
Hình 2.2 Dự báo mức sử dụng graphite trên thị trường thế giới

Theo Jerry Mercer (2014) [81], các đặc tính nhiệt vật lý của vật liệu điện cực quyết định khả năng xử lý năng lượng cắt và loại bỏ kim loại bằng *EDM*. Khi tạo ra tia lửa điện, dòng điện cực đại chỉ được phóng ra sau khi khe hở giữa điện cực và chi

tiết gia công bị phá vỡ. Tại thời điểm tạo ra tia lửa điện này, điện cực phát ra các electron va chạm với các phân tử của chất lỏng điện môi khi đó chất lỏng bị bốc hơi và một kênh năng lượng được hình thành cho phép tia lửa điện diễn ra. So với điện cực đồng thời gian bật của điện cực graphite ngắn hơn và có thể phát ra các electron này ở nhiệt độ thấp hơn nhiều và thời gian cần thiết để hình thành kênh năng lượng cũng ngắn hơn đáng kể. Do đó, graphite khởi tạo tia lửa điện nhanh hơn, dẫn đến *MRR* cao hơn đáng kể.

b) Thông số kỹ thuật

Ở nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng điện cực Graphite đến độ mòn điện cực khi *EDM* với vật liệu EN 90MnCrV8, khuyến nghị nên ưu tiên đường viền sắc nét của các phần hoạt động của nó để đạt được hiệu suất quá trình phóng điện tổng thể thuận lợi khi gia công thép dụng cụ EN 90MnCrV8 bằng điện cực dụng cụ graphite [82]. Nghiên cứu đó là cơ sở cho việc tạo hình điện cực như Hình 2.3. Bề mặt lỗ $\text{Ø}12$ và mặt đầu được gia công trên cùng 1 lần gá, mặt đầu được gia công theo phương hướng kính từ tâm hướng ra ngoài, đảm bảo độ vuông góc và sắc nét của giao tuyến giữa mặt đầu và mặt lỗ. Thông số kỹ thuật của và ứng dụng trong *EDM* Graphite HK được thể hiện trong Bảng 2.4.



Hình 2.3 Điện cực Graphite HK2

Bảng 2.4 Thông số kỹ thuật Graphite HK

Graphite HK	Khối lượng (g/cm ³)	Điện trở suất (μΩm)	Ứng suất uốn (MPa)	Độ cứng (SH)	Kích thước hạt (μm)	Độ nhám bề mặt (μm)	Ứng dụng
HK0	1,80	12,0	39,0	56	13	6,3	Thô
HK1	1,85	11,0	50,0	58	11	3,2	Thô
HK15	1,83	12,5	53,9	62	7	2,2	Thô
HK2	1,82	13,5	63,7	64	7	1,6	Tinh
HK75	1,82	16,5	65,7	72	4	1,0	Cao cấp
HK3	1,84	15,5	88,2	78	2	0,63	Siêu cao cấp
HK6	1,86	12,0	85,0	68	3	0,63	Siêu cao cấp

2.4 Thiết kế *Horn* siêu âm

Gia công xung điện (*EDM*) là phương pháp gia công đặc biệt cho phép gia công các vật liệu dẫn điện có độ cứng cao và hình dạng phức tạp mà các phương pháp truyền thống khó thực hiện (ví dụ như hợp kim cacbua WC-Co hay gốm TiN) [55, 83]. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của *EDM* là năng suất bóc tách vật liệu (*MRR*) thấp do hiệu suất chuyển đổi năng lượng của tia lửa điện không cao và hiện tượng mảnh vụn (debris) tích tụ trong khe gia công gây cản trở quá trình phóng điện [54, 66]. Điều này dẫn đến tốc độ cắt chậm và thậm chí gây phóng điện ngắn mạch, làm mòn điện cực nhanh chóng và ảnh hưởng xấu đến chất lượng bề mặt chi tiết.

Để khắc phục các hạn chế trên, nhiều nghiên cứu gần đây đã đề xuất tích hợp rung động siêu âm vào quá trình *EDM* nhằm tăng cường hiệu quả gia công [50, 83]. Trong phương pháp *EDM* hỗ trợ rung động siêu âm (*UV-EDM*), điện cực hoặc phôi được dao động ở tần số siêu âm (~20 kHz trở lên) nhờ một đầu horn gắn với đầu phát áp điện. Rung động siêu âm tạo ra dao động áp suất cao tần trong khe hở tia lửa, qua đó đẩy chất lỏng điện môi dao động mạnh, giúp cuốn trôi các phoi nóng chảy ra khỏi vùng gia công [62, 83]. Nhờ đó, mật độ mảnh vụn tích tụ giảm, hạn chế phóng điện bất thường (như tia lửa ngắn mạch) và cải thiện sự ổn định của quá trình phóng điện [62, 83]. Chẳng hạn, Zhang P và cộng sự (2024) khi nghiên cứu quá trình khoan *EDM* nhận thấy rằng rung động siêu âm đã thúc đẩy đáng kể việc loại bỏ phoi khỏi lỗ khoan, nhờ hiệu ứng xâm thực trong dung dịch điện môi và dòng chảy rối được tăng cường [46, 61]. Tương tự, Wang Y và cộng sự (2023) cũng chỉ ra hiện tượng *cavitation* (xâm thực thủy khí) do rung động siêu âm làm bong bật các bong bóng khí và cuốn theo vật liệu nóng chảy ra khỏi bề mặt gia công, qua đó ảnh hưởng đến cơ chế hình thành bề mặt cuối cùng theo hướng có lợi [46]. Bên cạnh đó, Chenxue và cộng sự (2022) qua quan sát trực tiếp đã xác nhận rằng các bong bóng plasma trong quá trình *EDM* chịu rung động sẽ biến đổi hành vi: chúng dao động và vỡ nhanh hơn, góp phần “khuấy” mạnh vùng gia công và tăng cường quá trình thải mảnh vụn [62]. Có thể nói, việc ứng dụng rung động siêu âm đã trở thành một giải pháp hữu hiệu để nâng cao khả năng loại bỏ mảnh vụn trong *EDM*, đặc biệt đối với các hốc sâu hoặc lỗ nhỏ khó xả phoi bằng phương pháp thông thường.

Nhờ cải thiện điều kiện phóng điện, *EDM* hỗ trợ siêu âm mang lại nhiều kết quả vượt trội về hiệu suất so với *EDM* thông thường. Nhiều nghiên cứu đã ghi nhận *MRR* được tăng đáng kể khi có rung động siêu âm. Abdullah và Shabgard (2008) nhận thấy ở chế độ gia công tinh, dao động siêu âm 20 kHz của điện cực giúp tăng tốc độ bóc tách vật liệu, đồng thời quá trình phóng điện diễn ra ổn định hơn hẳn (giảm hẳn hiện tượng hồ quang bám và tia lửa tắt, cháy không ổn định) [83]. Yin và cộng

sự (2023) còn báo cáo rằng khi dùng điện cực tích hợp rung động siêu âm theo phương thức xoắn - dọc (longitudinal-torsional), tốc độ cắt vi lỗ đạt tới $5,14 \times 10^5 \mu\text{m}^3/\text{s}$ - cao hơn khoảng 1,5 lần so với trường hợp chỉ quay điện cực thông thường [45]. Không những nâng cao năng suất, công nghệ *UV-EDM* còn giúp giảm các tác động không mong muốn: một số nghiên cứu cho thấy rung động siêu âm làm giảm rõ rệt mức độ mòn điện cực và sai lệch hình dạng chi tiết. Cụ thể, so với *EDM* thường, phương pháp có rung động đã giúp giảm tới khoảng 51,7% lượng mòn điện cực và giảm khoảng 33,5% độ côn của lỗ khoan sâu nhờ cải thiện việc đẩy phoi khỏi vùng gia công [38, 66]. Đồng thời, chất lượng bề mặt chi tiết gia công cũng được cải thiện nhờ ít mảnh vụn nóng chảy bám dính: Rajeswari và Shunmugam (2020) nhận thấy độ nhám bề mặt giảm đáng kể khi bổ sung rung động siêu âm và bột dẫn điện trong *EDM* gia công khuôn, cho phép đạt được bề mặt hoàn thiện tốt hơn so với phương pháp *EDM* truyền thống [65]. Tương tự, Dong và cộng sự (2024) báo cáo rằng việc kết hợp bột với rung động siêu âm trong *EDM* làm thay đổi hẳn cấu trúc lớp bề mặt: bề mặt gia công trở nên đồng đều, phẳng hơn và giảm thiểu các khuyết tật vi mô so với trường hợp không có rung siêu âm [56]. Thậm chí, một ứng dụng đặc biệt là *EDM* trộn bột bạc với hỗ trợ siêu âm đã được nghiên cứu nhằm tạo bề mặt tích hợp hạt bạc kháng khuẩn; kết quả cho thấy rung động siêu âm giúp phân tán đều hạt bạc trong lớp bề mặt và nâng cao tính năng kháng khuẩn của chi tiết [56]. Những cải tiến về bề mặt này cho thấy tiềm năng lớn của công nghệ *UV-EDM* trong việc vừa nâng cao năng suất vừa cải thiện chất lượng sản phẩm.

Đáng chú ý, hiệu quả của *UV-EDM* thể hiện rõ rệt nhất ở các bài toán gia công vi cấu trúc hoặc chi tiết dạng hốc sâu, nơi mà phương pháp *EDM* thường gặp khó khăn về thoát phoi. Nhiều nghiên cứu về *micro-EDM* mô đã chứng minh ưu thế của rung động siêu âm. Singh và cộng sự (2018) khi thực hiện khoan vi lỗ trên hợp kim titan báo cáo rằng việc áp dụng dao động siêu âm giúp quá trình phóng điện ổn định hơn và nâng cao *MRR* đáng kể, đặc biệt khi tối ưu các thông số như biên độ, tần số rung phù hợp [50]. Xing và cộng sự (2021) cũng nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số công nghệ đến hiệu suất *micro-EDM* có rung động, kết luận rằng trong khoảng thông số tối ưu, rung động siêu âm cho phép tăng tốc độ gia công và giảm độ nhám bề mặt một cách đồng thời [54]. Gần đây, hướng tiếp cận tối ưu hóa đa mục tiêu cho quá trình *UV-EDM* đã được triển khai. Chẳng hạn, Xu và cộng sự (2024) áp dụng thuật toán tối ưu để đồng thời cực đại hóa *MRR* và tối thiểu hóa mòn điện cực, độ nhám trong gia công *micro-EDM* hợp kim Ti-6Al-4V; kết quả cho thấy bộ thông số tối ưu khi có rung động siêu âm cho hiệu suất vượt trội hơn hẳn so với *EDM* thường [60]. Song song đó, nhiều phương thức dao động siêu âm mới lạ được đề xuất nhằm

nâng cao hơn nữa hiệu quả gia công vi cấu trúc. Li và cộng sự (2020) giới thiệu cơ chế dao động siêu âm hai chiều theo quỹ đạo tròn (*UCV*) của điện cực, giúp cải thiện chất lượng lỗ khoan vi mô (giảm độ không tròn và tăng độ đồng nhất giữa các lỗ) so với điện cực tĩnh [47]. Hou và Bai (2023) thậm chí phát triển phương pháp rung siêu âm ba chiều tương đối giữa điện cực và phôi, qua đó tăng cường hiệu quả cuốn phoi trong không gian hẹp của *micro-EDM*, giúp gia công ổn định các hốc vi mô phức tạp [49]. Đối với các biên dạng khó, như rãnh hẹp tỷ lệ chiều sâu lớn, rung động siêu âm tỏ ra đặc biệt hữu dụng: Xing và cộng sự (2023) đã thực hiện phay vi rãnh bằng *EDM* trên thép và nhận thấy có thể tạo được rãnh rất sâu với chiều rộng nhỏ khi có hỗ trợ siêu âm, điều gần như không thể đạt được nếu chỉ dùng *EDM* thông thường do hạn chế về thoát phoi và ổn định tia lửa [84]. Như vậy, công nghệ *UV-EDM* đã mở ra hướng mới để gia công hiệu quả các chi tiết có hình dạng và kích thước siêu nhỏ, hoặc các lỗ sâu, bằng cách khắc phục những trở ngại cố hữu của *EDM* truyền thống.

Ngoài ra, sự kết hợp rung động siêu âm với các biện pháp hỗ trợ khác cũng là xu hướng thu hút nhiều sự quan tâm. Lin và cộng sự (2014) đã tích hợp đồng thời dao động siêu âm và lực từ trường vào quá trình *EDM*, qua đó tạo nên một quy trình hybrid giúp tăng tốc độ loại bỏ phoi và cải thiện cả *MRR* lẫn giảm mòn điện cực khi gia công thép SKD61 so với từng phương pháp áp dụng riêng rẽ [59]. Tương tự, Singh và cộng sự (2020) nghiên cứu tác động đồng thời của rung động siêu âm và từ trường quay trong *micro-EDM* và ghi nhận hiệu ứng cộng hưởng tích cực: hai yếu tố này hỗ trợ lẫn nhau, giúp dòng phoi thoát tốt hơn và hồ quang ổn định hơn, kết quả là nâng cao năng suất và độ chính xác gia công [67]. Ở hướng so sánh tách biệt, Gholipour và các cộng sự (2020) thực hiện đối sánh giữa *EDM* có rung động siêu âm và *EDM* có hỗ trợ từ trường; kết quả cho thấy phương pháp sử dụng rung động siêu âm vượt trội hơn hẳn về khả năng nâng cao *MRR* cũng như giảm độ nhám bề mặt [58]. Những nghiên cứu này một lần nữa khẳng định vai trò hiệu quả của rung động siêu âm trong việc cải thiện các chỉ tiêu năng suất và chất lượng *EDM*, đồng thời mở ra khả năng kết hợp công nghệ này với các kỹ thuật hỗ trợ khác để tối ưu quá trình gia công.

Tổng quan các công trình nghiên cứu nói trên cho thấy việc ứng dụng rung động siêu âm trong *EDM* đã và đang mang lại những cải tiến vượt bậc về năng suất bóc tách, độ ổn định quá trình và chất lượng bề mặt sản phẩm. Tuy nhiên, để triển khai thành công phương pháp này trong thực tiễn, một thách thức quan trọng cần giải quyết là thiết kế tối ưu đầu *horn* siêu âm - bộ phận trung gian gắn giữa đầu phát dao động và điện cực cắt. *Horn* có nhiệm vụ khuếch đại và truyền tải năng lượng dao động siêu âm đến điện cực làm việc, do đó hình dạng và kích thước của *horn* ảnh hưởng trực tiếp đến biên độ dao động tại khoảng cách làm việc cũng như độ bền rung

của hệ thống. Thực tế, nếu *horn* không được thiết kế đúng chế độ cộng hưởng ở tần số 20 kHz hoặc hình dạng không phù hợp, biên độ dao động truyền đến điện cực sẽ không đủ lớn, thậm chí gây phát nhiệt và phá hủy *horn*. Ngược lại, một thiết kế *horn* tối ưu (ví dụ dạng trụ bậc, làm bằng thép 90CrSi độ bền cao) có thể tạo ra biên độ dao động lớn tại mũi điện cực và chịu được ứng suất động, từ đó phát huy tối đa hiệu ứng siêu âm trong vùng gia công. Mặc dù tầm quan trọng của *horn* siêu âm là hiển nhiên, các nghiên cứu tập trung vào thiết kế và tối ưu hóa cấu trúc *horn* trong EDM hỗ trợ siêu âm còn khá hạn chế. Đặc biệt, đối với bài toán gia công bề mặt trụ ngoài bằng EDM với hỗ trợ của rung động siêu âm - còn chưa được nghiên cứu - thì việc thiết kế *horn* phù hợp (về chiều dài, đường kính các bậc, v.v.) là hết sức cần thiết để đảm bảo hiệu quả truyền rung và độ ổn định cho hệ thống. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu thiết kế tối ưu đầu *horn* siêu âm hai bậc chuyên dụng cho UV-EDM gia công bề mặt trụ ngoài bằng thép hợp kim dụng cụ 90CrSi. Nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa kích thước hình học của *horn* nhằm đảm bảo cộng hưởng tại 20 kHz, đồng thời nâng cao MRR và duy trì độ ổn định quá trình.

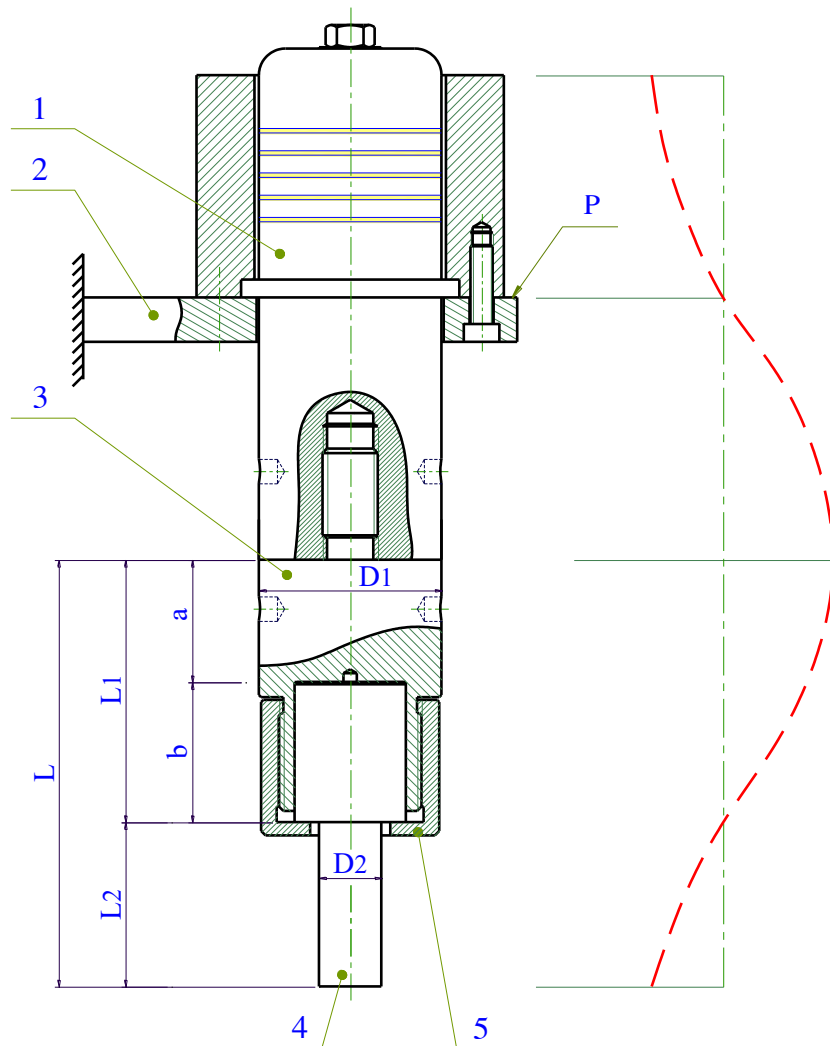
2.4.1 Cơ sở của thiết kế *horn*

Gia công UV-EDM là một hướng phát triển tiên tiến của công nghệ EDM truyền thống, nhằm cải thiện tốc độ bóc tách vật liệu (MRR), nâng cao chất lượng bề mặt (*Ra*), và ổn định quá trình phóng điện. Tùy theo cấu hình hệ thống, dao động siêu âm có thể được truyền vào phôi [18], vào điện cực [68, 85], hoặc vào môi trường điện môi [71]. Trong số đó, cấu hình phổ biến nhất là truyền dao động vào điện cực nhờ khả năng tích hợp dễ dàng với hệ thống EDM tiêu chuẩn hiện hành.

Tuy nhiên, cấu hình này trở nên không phù hợp khi sử dụng điện cực graphite do đặc tính truyền âm của vật liệu phi kim loại, mặt khác graphite bản chất giòn và dễ gãy dưới tác động kích thích cơ học tần số cao. Do đó, trong nghiên cứu này, để khắc phục nhược điểm của điện cực graphite, phương pháp tiếp cận được lựa chọn là truyền dao động siêu âm trực tiếp vào phôi - một cấu hình ít phổ biến hơn nhưng phù hợp với đặc tính vật liệu và yêu cầu công nghệ. Cụ thể, dao động được tạo ra bởi bộ phát siêu âm (transducer), sau đó truyền qua đầu *horn* được thiết kế riêng và liên kết cơ học với bề mặt trụ ngoài của chi tiết, trong khi điện cực graphite giữ trạng thái tĩnh trong suốt quá trình gia công.

Mục tiêu thiết kế của đầu *horn* là đảm bảo biên độ dao động cực đại tại bề mặt tiếp xúc giữa *horn* và chi tiết - tương ứng với vị trí bụng sóng (anti-node) của sóng dừng dọc truyền trong *horn*. Để đạt được điều này, *horn* cần được tối ưu hình học để cộng hưởng chính xác tại tần số hoạt động 20 kHz, đồng thời bảo đảm vị trí tiếp xúc khớp với vị trí một phần tư bước sóng ($\lambda/4$) tính từ nút sóng - thường nằm tại giao

diện giữa transducer và *horn*. Việc đạt được điều kiện cộng hưởng này là yếu tố then chốt để khuếch đại hiệu quả dao động cơ học và nâng cao hiệu quả truyền năng lượng vào vùng gia công.



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.

Hình 2.4 minh họa cấu trúc cụm đầu horn siêu âm được sử dụng trong nghiên cứu này. Bộ phát siêu âm (1) được gắn cố định trên đầu máy EDM (2), trong khi đầu horn (3) được nối với transducer thông qua mối ren tại vị trí P – tương ứng với nút dao động (điểm biên độ bằng “0”) trong quá trình dao động dọc. Phía dưới của horn được thiết kế một lỗ đồng tâm để định vị và gá chặt chi tiết gia công (4) với việc cố định bằng đai ốc hãm (5).

Vật liệu chế tạo *horn* được lựa chọn là thép dụng cụ 90CrSi do đặc tính mô đun đàn hồi cao, chịu nhiệt tốt và truyền sóng dọc hiệu quả. Hình dạng hình học của *horn* - bao gồm mặt cắt dạng bậc, chiều dài các đoạn - được xác định ban đầu dựa trên các mô hình lý thuyết về truyền sóng dọc và sau đó được hiệu chỉnh thông qua thử nghiệm thực tế nhằm tối ưu hóa cộng hưởng.

Khác biệt rõ nét giữa nghiên cứu này với các cấu hình truyền thống [68, 85] chính là việc thiết kế đầu *horn* truyền dao động siêu âm vào chi tiết thay vì qua điện cực. Điều này không chỉ giúp khắc phục nhược điểm cơ học của graphite, mà còn mở ra một hướng đi kỹ thuật mới trong ứng dụng *UV-EDM* cho các chi tiết hình trụ ngoài – vốn có yêu cầu cao về độ đồng đều bề mặt và kiểm soát vùng gia công.

2.4.2 Tính toán lý thuyết chiều dài đầu *horn*

Để đơn giản hóa quá trình mô hình hóa và chế tạo, đầu *horn* trong nghiên cứu này được thiết kế dạng hình trụ hai bậc đồng trục, có đường kính khác nhau nhưng cùng vật liệu (thép hợp kim dụng cụ 90CrSi). Đoạn thứ nhất (trên) có đường kính $D_1 = 41$ mm, tương ứng với đường kính ngoài của transducer tại vị trí lắp. Đoạn thứ hai (dưới) có đường kính $D_2 = 14$ mm và chiều dài $L_2 = 27$ mm - được lựa chọn dựa trên kích thước thực tế của đầu chày dập viên nén cho ngành dược phẩm. Phân bố dao động dọc của đầu *horn* được minh họa trong Hình 2.5. Kết cấu của *horn* được thể hiện ở Hình 2.6.

Mục tiêu thiết kế là xác định chiều dài tối ưu của đoạn trên (L_1) sao cho toàn bộ *horn* dao động cộng hưởng tại tần số kích thích và truyền hiệu quả năng lượng siêu âm đến chi tiết gia công. Tuy nhiên, để rút ngắn thời gian và giảm chi phí tính toán cho tối ưu hóa toàn bộ *horn*, chiều dài L_1 được phân tách thành hai thành phần $L_1 = a + b$ với $a = 37$ mm là giá trị cố định do yêu cầu về không gian lắp ráp cơ khí giữa *horn* và transducer, và b là biến duy nhất cần tối ưu trong nghiên cứu này.

Dựa trên phân bố dao động dọc trong Hình 2.5, chiều dài tổng của đầu *horn* cần thỏa mãn điều kiện cộng hưởng toàn phần theo công thức:

$$L = L_1 + L_2 = a + b + L_2 = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f} \quad (2.2)$$

Trong đó, $f = 20000$ Hz là tần số rung siêu âm, và c là vận tốc truyền sóng dọc trong vật liệu *horn*. Với vật liệu là thép dụng cụ 90CrSi, vận tốc truyền sóng được tính bởi công thức:

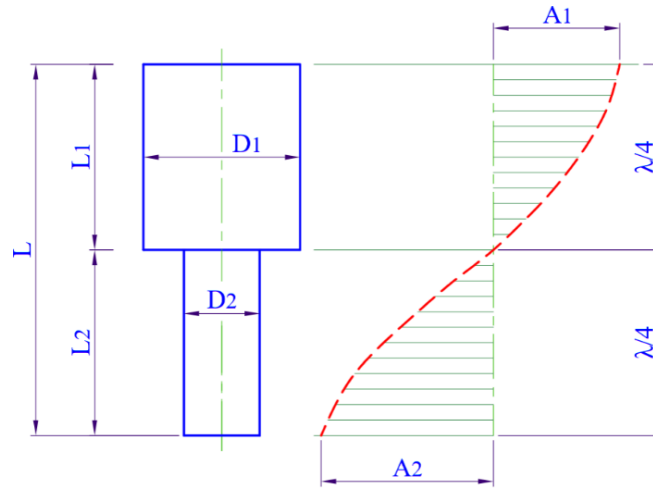
$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (2.3)$$

Trong đó: E là mô đun đàn hồi (Pa): $E = 205 \times 10^9$ Pa;

ρ là khối lượng riêng (kg/m^3): $\rho = 7850$ kg/m^3 ;

Thay số vào phương trình (2.3), ta được:

$$c = \sqrt{205 \cdot 10^9 / 7850} \approx 5110 \text{ m/s} \quad (2.4)$$



Hình 2.5 Dạng dao động dọc của đầu horn hai bậc

Từ đó, bước sóng dọc tại tần số kích thích $f = 20000$ Hz là:

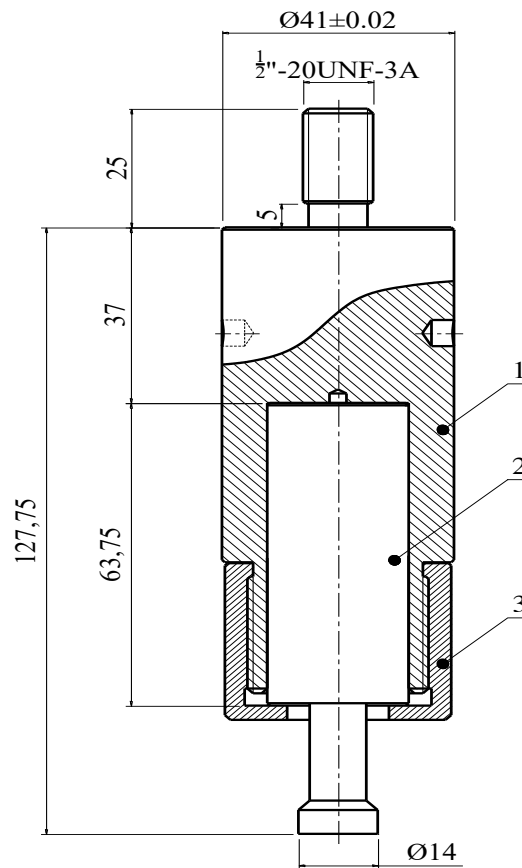
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5110}{20000} = 0,2555 \text{ m} = 255,5 \text{ mm} \quad (2.5)$$

Thay (2.5) vào (2.2) ta có:

$$L = \lambda/2 = 127,75 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Từ đó, giải phương trình tìm giá trị cần thiết cho đoạn b :

$$b = L - a - L_2 = 127,75 - 37 - 27 = 63,75 \text{ mm} \quad (2.7)$$



Hình 2.6 Horn - Đầu rung siêu âm

1 . Horn

2 . Chi tiết

3 . Đại ốc

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

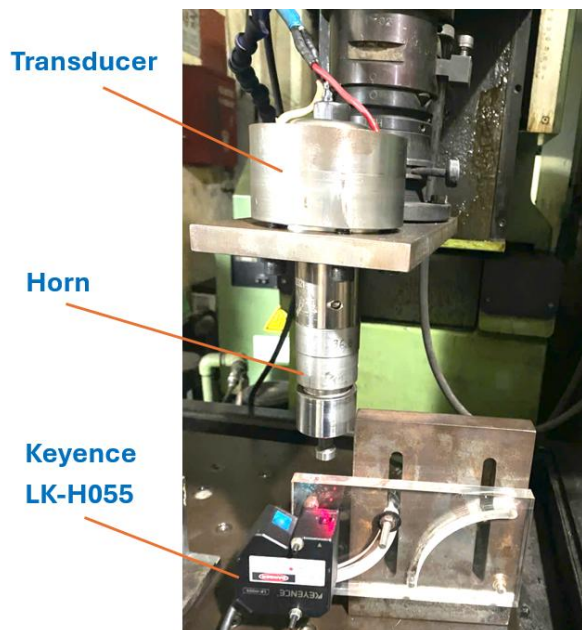
Chiều dài tối ưu L cho đầu *horn* siêu âm được xác định bằng thực nghiệm với hai bước chính như sau:

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

Mục tiêu của bước này là xác định chiều dài đầu *horn* sao cho tạo ra biên độ dao động dọc cực đại khi được kích thích ở tần số không đổi 20 kHz. Dựa trên điều kiện cộng hưởng lý thuyết đã trình bày trong phương trình (2.6), chiều dài mục tiêu được tính là $L = 127,75$ mm.

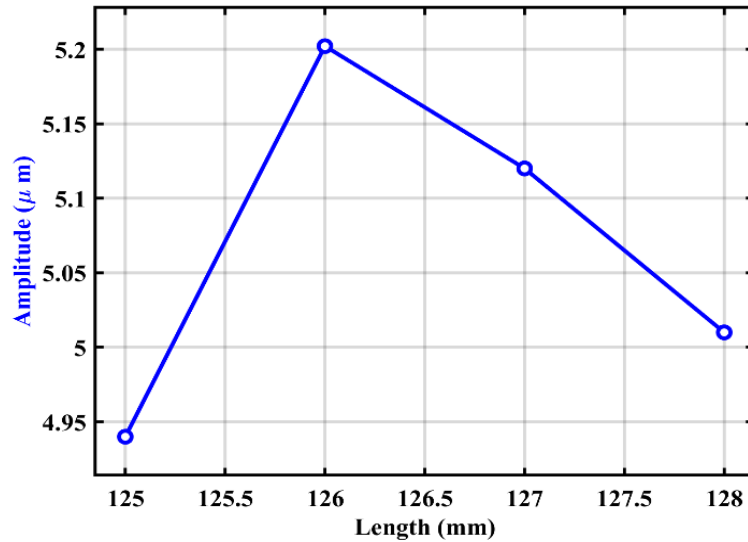
Để kiểm chứng thực nghiệm và tìm ra chiều dài tương ứng với biên độ cực đại, bốn mẫu đầu *horn* nguyên công được chế tạo với các chiều dài tổng lần lượt là 125, 126, 127 và 128 mm. Các chiều dài này được hiện thực bằng cách thay đổi tham số thiết kế b từ 61 đến 64 mm với bước tăng 1 mm, trong khi giữ 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 dịch chuyển laser thương mại (Keyence LK-H055, Keyence Corporation, Nhật Bản). Sơ đồ bố trí thí nghiệm được minh họa ở Hình 2.7 Mỗi đầu *horn* được lắp vào hệ thống siêu âm, kích thích ở tần số không đổi 20 kHz, và biên độ dao động tại đầu tự do được ghi lại.



Hình 2.7 Setup đo biên độ dao động

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. Các kết quả này được sử dụng để xác định chiều dài tối ưu sao cho đạt biên độ lớn nhất và đảm bảo cộng hưởng tại tần số mong muốn.



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

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

Sau khi xác định được chiều dài đầu horn cho biên độ cực đại là 126 mm, bước tiếp theo nhằm 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 phản ánh các hiệu ứng phi tuyến tiềm năng.

Bảng 2.5 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

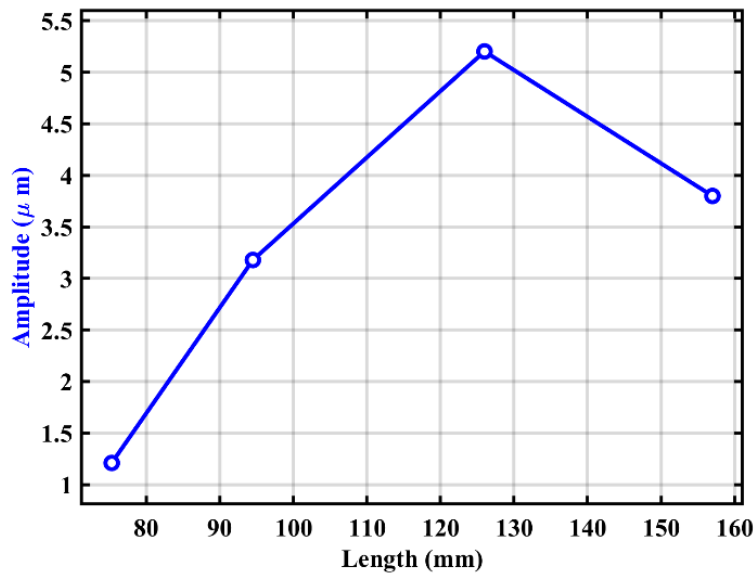
Biên độ lớn nhất đo được ở Bước 1 là 5,2 μm tại chiều dài $L = 126$ mm, được chọn làm mức cao cho biến A . Để xác định hai mức còn lại là 1,2 μm và 3,2 μm, các mẫu horn bổ sung được chế tạo bằng cách điều chỉnh tham số b , tức là thay đổi tổng chiều dài $L = a + b$.

Thông qua các đo đạc tương tự như Bước 1, các chiều dài đầu horn tương ứng với các giá trị biên độ mục tiêu được xác định. Kết quả được trình bày trong Bảng 2.6, bao gồm các giá trị b , chiều dài tổng L , và biên độ dao động A tương ứng. Mỗi

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 nhạy với điều kiện cộng hưởng.

Bảng 2.6 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)

Các thông tin này tạo cơ sở thực tiễn để lựa chọn chính xác các chiều dài horn tương ứng với mức biên độ thấp, trung bình và cao, phục vụ cho quá trình bố trí thí nghiệm tối ưu hóa *UV-EDM* bằng phương pháp *BBD*.

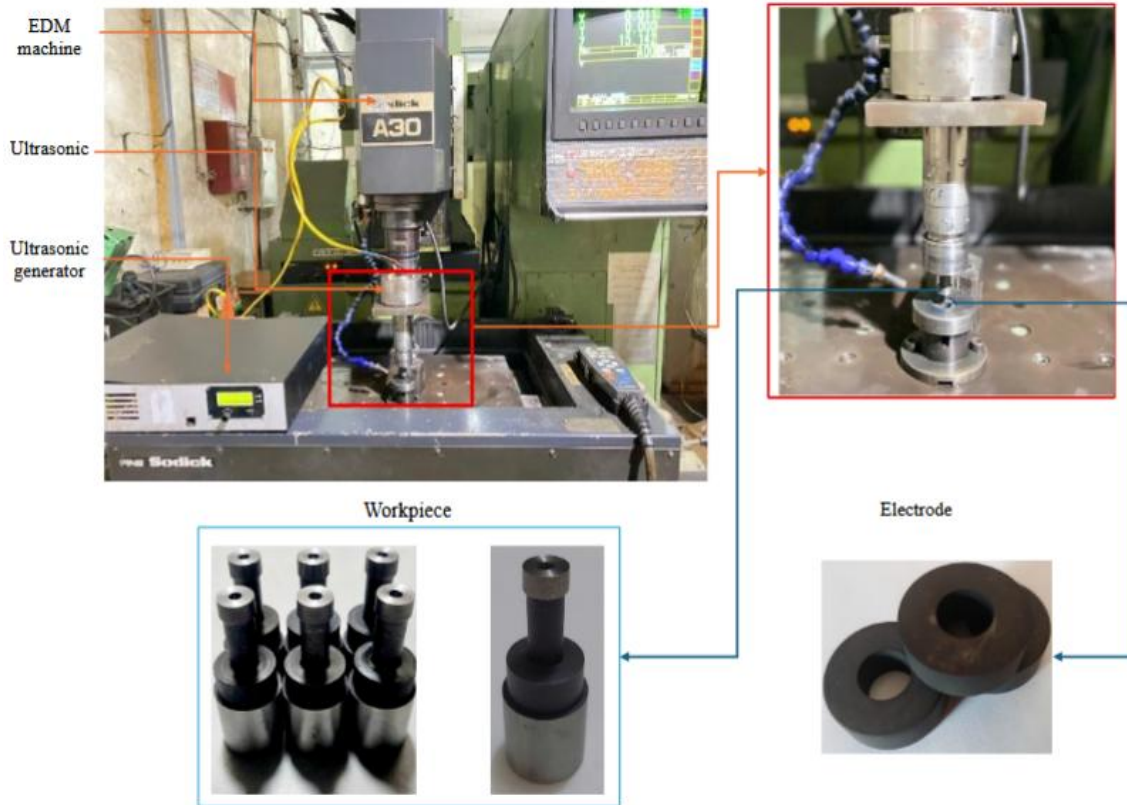
2.5 Thiết kế thí nghiệm và thu thập dữ liệu

2.5.1 Thiết lập hệ thống thí nghiệm

Các thí nghiệm gia công xung điện có trợ giúp rung động siêu âm (*UV-EDM*) được thực hiện trên hệ thống thí nghiệm như minh họa trong Hình 2.10. Máy gia công được sử dụng là máy xung *CNC Sodick*, model: MarkA30, có khả năng điều khiển chính xác các thông số công nghệ trong quá trình gia công. Hệ thống rung siêu âm được tích hợp từ nguồn phát *MPI WG-3000* (Thụy Sĩ) 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.

Đầu khuếch đại biên độ (*Horn*) sử dụng trong thí nghiệm được thiết kế theo các thông số hình học đã trình bày chi tiết ở Mục 2.4 trước đó, đảm bảo cộng hưởng

với tần số siêu âm nhằm truyền rung động hiệu quả đến điện cực. Điện cực sử dụng trong toàn bộ thí nghiệm là graphite loại HK2, trong khi dung dịch điện môi là Diel MS 7000 (hãng Total, Pháp) được sử dụng ổn định trong suốt quá trình gia công để đảm bảo tính nhất quán của môi trường xung điện.



Hình 2.10 Setup thí nghiệm UV-EDM

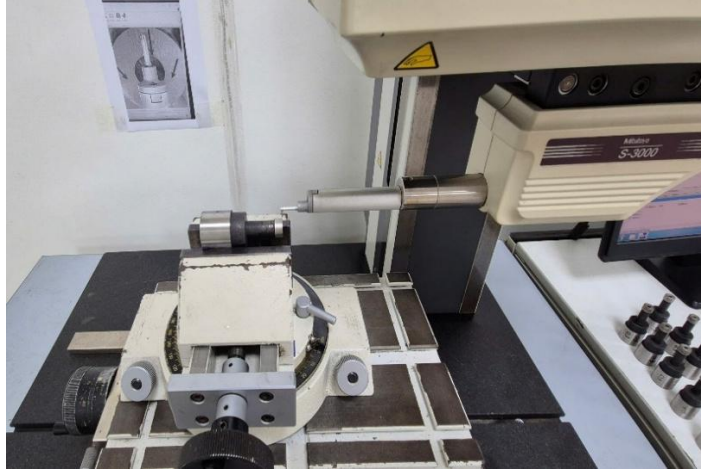
Thiết kế thí nghiệm được thực hiện với 5 thông số công nghệ đầu vào, bao gồm: Biên độ rung siêu âm (A), thời gian phát xung (T_{on}), thời gian ngắt xung (T_{off}), dòng điện xung (I_p , A) và điện áp servo (SV , V).

2.5.2 Thiết bị đo lường

Để đánh giá hiệu quả quá trình gia công, 3 đại lượng đầu ra chính được đo lường phân tích: Trong mỗi thí nghiệm, chi tiết 90CrSi được định vị trên *Horn* qua lỗ đáy kín $\varnothing 25$ và được kẹp chặt bằng đai ốc với hệ ren 20UNF-3B, điện cực graphite HK2 được gá lắp trên bàn máy thông qua đồ gá chuyên dụng.

Sau mỗi lần gia công, ba đại lượng đầu ra được đo lường phân tích:

- Độ nhám bề mặt Ra (μm): Được đo bằng thiết bị đo nhám Mitutoyo SV3100 (Nhật Bản), với độ chính xác cao, đảm bảo khả năng phát hiện thay đổi nhỏ trên bề mặt chi tiết sau gia công. Thu thập số liệu đo tại ba vị trí khác nhau dọc theo chiều dài vùng gia công. Giá trị trung bình được sử dụng làm kết quả đại diện cho mỗi lần thí nghiệm.



Hình 2.11 Đo độ nhám bằng thiết bị Mitutoyo SV3100

- 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 (độ chính xác 0,001 g). Thời gian gia công được ghi nhận trực tiếp từ chương trình điều khiển máy CNC. MRR được tính theo công thức:

$$MRR = \frac{m_{before} - m_{after}}{t} \times 3600 \quad (2.8)$$

Trong đó m_{before} và m_{after} lần lượt là khối lượng chi tiết trước và sau gia công (g); t là thời gian gia công (s).

Các thông số khác hiển thị trên màn hình máy EDM.

- Trong nghiên cứu này, kính hiển vi kỹ thuật số PS-530G (Hình 2.12) 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). Hình ảnh thu được có gắn thước tỷ lệ (scale bar), cho phép xác định chính xác mức độ mòn tại vùng biên của điện cực.



Hình 2.12 Đo mòn điện cực dùng kính hiển vi kỹ thuật số PS-530G

Kính hiển vi PS-530G là loại kính stereo, xuất xứ Đài Loan, được trang bị hệ thống chiếu sáng LED vòng, giúp tăng độ tương phản tại vùng tiếp giáp giữa điện cực và lớp mòn. Thiết bị có ống zoom quang học với dải phóng đại $0,7\times-4,5\times$, cho

phép lựa chọn mức phóng đại phù hợp với kích thước chi tiết. Camera được gắn thông qua ống trung gian $0,5\times$, cho phép hiển thị và lưu trữ hình ảnh trực tiếp trên máy tính.

Trong quá trình đo, ảnh mặt cắt điện cực được ghi nhận ở độ phóng đại thích hợp và sử dụng thước tỷ lệ trên ảnh để xác định trực tiếp chiều sâu mòn y theo phương đứng. Nhờ hệ thống quang học ổn định và nguồn sáng tập trung, hình ảnh thu được có độ sắc nét cao, đảm bảo độ tin cậy trong việc xác định biên mòn và tính toán chỉ tiêu mòn điện cực.

Độ mòn điện cực theo phương đứng được xác định theo công thức:

$$HWR = y/t \quad (2.9)$$

Trong đó:

y (mm): lượng mòn xác định theo phương đứng.

t (h): thời gian gia công.

2.5.3 Tiến hành thí nghiệm và thu thập dữ liệu

Sau khi hệ thống thiết bị được thiết lập và hiệu chuẩn như mô tả ở mục trước, các thí nghiệm *UV-EDM* được tiến hành lần lượt theo ma trận thiết kế Box–Behnken với tổng số 46 tổ hợp thông số công nghệ, bao phủ toàn bộ không gian khảo sát của năm biến đầu vào.

Trong mỗi thí nghiệm, điện cực graphite HK2 được gá chắc chắn trên bàn máy thông qua đồ gá như Hình 2.13, trong khi chi tiết thép 90CrSi được liên kết với đầu rung siêu âm thông qua đầu tăng biên cộng hưởng.

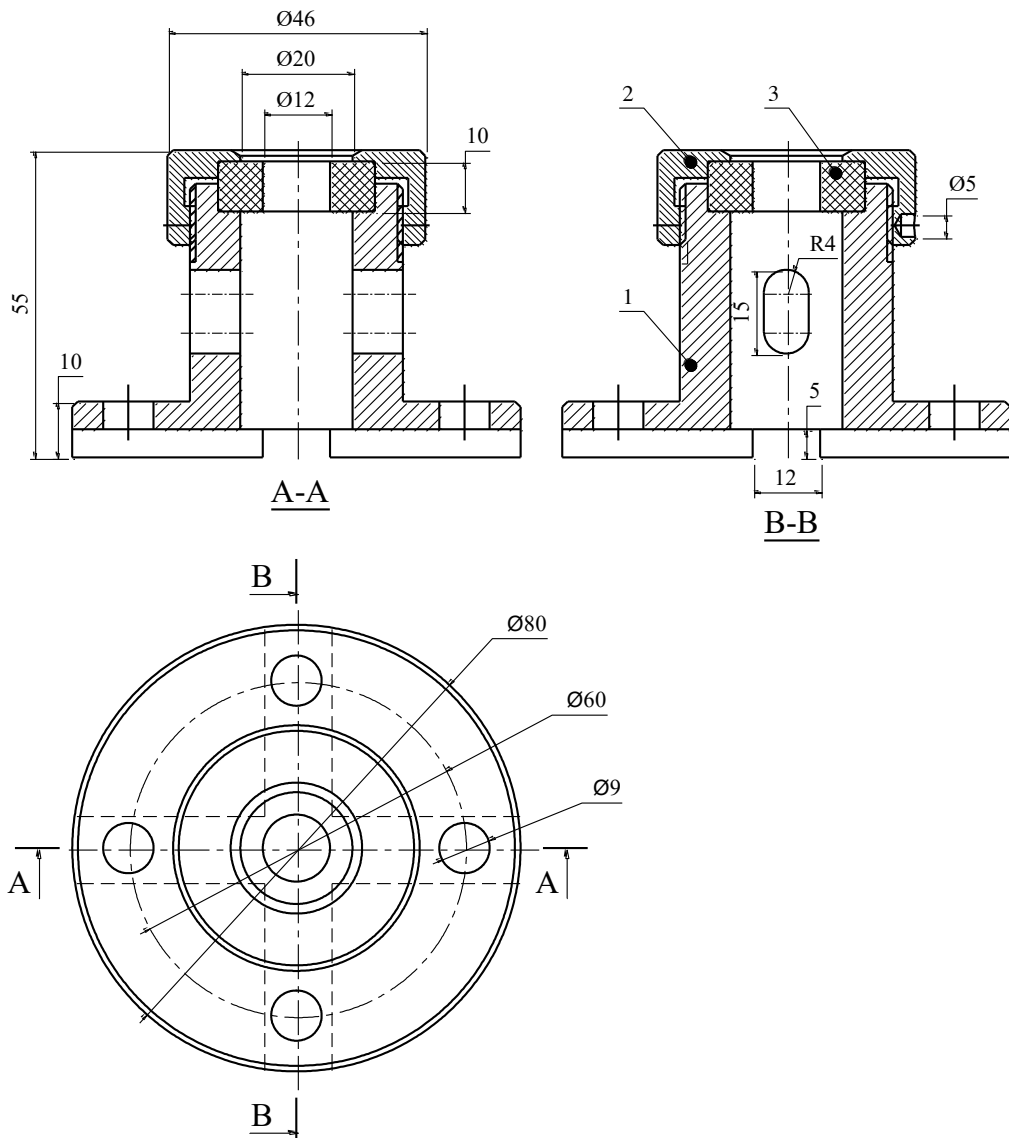
Các thông số công nghệ gồm biên độ rung siêu âm (A), thời gian phát xung (T_{on}), thời gian ngắt xung (T_{off}), dòng điện xung (I_p) và điện áp servo (SV) được thiết lập theo từng tổ hợp thí nghiệm. Quá trình gia công diễn ra trên bề mặt trụ ngoài của chi tiết, với thời gian gia công t (tính bằng giây) được ghi nhận trực tiếp từ bộ điều khiển *CNC*.

Thông số công nghệ: Năm thông số đầu vào được khảo sát trong nghiên cứu được thể hiện trong Bảng 2.7. Trong đó mức điều chỉnh về thông số biên độ rung siêu âm căn cứ vào quá trình thực nghiệm khi thiết kế *horn* siêu âm.

Bảng 2.7 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

Việc lựa chọn thông số đầu vào dựa trên quan sát hiện tượng thực tế, tài liệu tham khảo, ý kiến của chuyên gia hoặc nghiên cứu thực nghiệm thăm dò. Sau mỗi lần gia công, ba đại lượng đầu ra được đo lường và tính toán như sau:



Hình 2.13 Đồ gá điện cực Graphite.

1 - Thân đồ gá

2 - Dai ốc

3- Điện cực GRaphite

- **Độ nhám bề mặt Ra (μm):** Được đo bằng thiết bị Mitutoyo SV3100 (Nhật Bản) tại ba vị trí khác nhau dọc theo chiều dài vùng gia công. Giá trị trung bình được sử dụng làm kết quả đại diện cho mỗi lần thí nghiệm.
- **Tốc độ bóc tách vật liệu MRR (g/h):** được tính toán dựa trên sự chênh lệch khối lượng chi tiết trước và sau gia công, đo bằng cân điện tử WT3003NE với độ chính xác 0,001 g.
- **Tốc độ mòn điện cực theo phương đứng HWR (mm/h):** được xác định thông qua phân tích mặt cắt điện cực sau khi gia công. Cụ thể, các điện cực graphite sau khi sử dụng được cắt đôi bằng máy cắt dây, sau đó chụp ảnh mặt cắt bằng

kính hiển vi có gắn thước đo tỉ lệ (scale) để xác định lượng mòn góc theo phương đứng (ký hiệu là y , đơn vị mm).

Giá trị HWR được tính theo công thức:

$$HWR = y/t \quad (3.9)$$

Trong đó: y là lượng mòn góc theo phương đứng (mm);

t là thời gian gia công (h).

Toàn bộ dữ liệu đầu vào và đầu ra của 46 thí nghiệm được kiểm tra, làm sạch và 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 2.8 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

No.	A (μm)	T_{on} (μs)	T_{off} (μs)	I_p (A)	SV (V)	MRR (g/h)	Ra μm	HWR (mm/h)
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

Khác với các cấu hình truyền thống đưa rung động siêu âm vào điện cực [19, 20], cấu hình trong nghiên cứu này truyền dao động trực tiếp vào chi tiết gia công thông qua một đầu *horn* được thiết kế đặc biệt, giúp khắc phục nhược điểm cơ học của graphite và đảm bảo ổn định cho quá trình phóng điện.

Thiết kế và tối ưu hóa đầu *horn* được xác định trên cơ sở kết hợp tính toán lý thuyết và kiểm chứng thực nghiệm. Kết quả hiệu chỉnh cho thấy chiều dài cộng hưởng thực tế đạt 126 mm với biên độ 5,2 μm ; đồng thời các cấu hình cho biên độ trung bình và thấp cũng được thiết lập nhằm phục vụ thiết kế *Box-Behnken*. Các kết quả

này tạo cơ sở khoa học cho việc đánh giá định lượng ảnh hưởng của biên độ siêu âm đến MRR , Ra và tốc độ mòn điện cực HWR trong quá trình $UV-EDM$.

Nghiên cứu đề xuất một hướng tiếp cận khả thi trong thiết kế hệ thống $UV-EDM$ với cấu hình rung áp dụng cho chi tiết trụ ngoài, đồng thời ghi nhận những tín hiệu tích cực về khả năng ứng dụng trong gia công chính xác các chi tiết dạng trụ có yêu cầu cao về chất lượng bề mặt.

Phương thức rung dọc trục được lựa chọn do khả năng cải thiện thoát phoi và ổn định phóng điện trong EDM . Việc truyền rung siêu âm trực tiếp vào phôi thép 90CrSi tỏ ra hợp lý nhờ đặc tính truyền âm tốt hơn so với graphite, trong khi điện cực graphite được cố định để bảo đảm ổn định cơ học và hạn chế hư hỏng, tạo tiền đề cho các thí nghiệm ở các chương tiếp theo.

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

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

Trong mục này, các mô hình toán học được xây dựng để mô tả mối quan hệ giữa năm thông số công nghệ đầu vào (biên độ rung A , thời gian phát xung T_{on} , thời gian ngắt T_{off} , dòng điện xung I_p , điện áp servo SV) và ba chỉ tiêu đầu ra quan trọng gồm độ nhám bề mặt (Ra), tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) và tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR). Trong khuôn khổ tối ưu hóa đơn mục tiêu, phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) được sử dụng để xây dựng mô hình hồi quy bậc hai, nhằm mô tả định lượng ảnh hưởng của các thông số công nghệ lên chỉ tiêu cần tối ưu. Mô hình *Gaussian Process Regression* (GPR) được sử dụng như một bước nâng cao trong trường hợp có dấu hiệu cho thấy mô hình RSM chưa mô tả đầy đủ tính phi tuyến của hệ thống, nhằm cải thiện độ chính xác dự đoán và nâng cao hiệu quả tối ưu hóa các đầu ra.

3.1.1 Cơ sở lý thuyết của RSM

Phương pháp bề mặt đáp ứng (*Response Surface Methodology* – RSM) là một tập hợp các kỹ thuật toán học và thống kê được phát triển nhằm mô hình hóa, phân tích và tối ưu hóa các quá trình trong đó một hoặc nhiều đầu ra (*response*) phụ thuộc vào một số biến đầu vào (*input variables*). RSM đặc biệt hữu ích trong trường hợp mục tiêu là tìm mối quan hệ hàm giữa các thông số công nghệ và các chỉ tiêu đầu ra, từ đó xác định điều kiện vận hành tối ưu.

Giả định cơ bản trong RSM là hàm mục tiêu có thể xấp xỉ tốt bằng một mô hình hồi quy bậc hai trong một khoảng khảo sát nhất định. Dạng tổng quát của mô hình hồi quy bậc hai với k biến đầu vào được viết như sau:

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

Trong đó:

- y là biến đầu ra (Ra , MRR hoặc HWR);
- x_i và x_j là biến đầu vào đã được mã hóa (coded variables), với giá trị chuẩn hóa trong khoảng $[-1, 0, +1]$;
- β_0 là hệ số hằng;
- $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ là hệ số tuyến tính, hệ số bậc hai và hệ số tương tác của các biến;
- ε là sai số ngẫu nhiên, giả định có phân phối chuẩn, trung bình bằng “0” và phương sai không đổi.

Giả định phân phối chuẩn cho phép áp dụng các phương pháp suy luận thống kê một cách chặt chẽ và đảm bảo tính tối ưu của các ước lượng thu được từ phương pháp bình phương tối thiểu. Việc giả định trung bình của sai số bằng “0”, tức kỳ vọng

toán học $E[\varepsilon]$ trên toàn bộ phân phối của sai số bằng “0”, giúp bảo đảm rằng các sai số dương và âm triệt tiêu lẫn nhau khi xét trên số lượng lớn lần lặp của thí nghiệm. Nhờ đó, sai số không tạo ra xu hướng lệch có hệ thống và mô hình phản ánh đúng mối quan hệ thực giữa các biến đầu vào và biến phản hồi.

Trong nghiên cứu này, 5 thông số đầu vào gồm: biên độ rung siêu âm (A), thời gian phát xung (T_{on}), thời gian ngắt xung (T_{off}), dòng điện xung (I_p) và điện áp servo (SV) được đưa vào mô hình RSM để mô tả ảnh hưởng đến từng đầu ra riêng biệt (Ra , MRR , HWR).

Các biến đầu vào được chuẩn hóa trước khi đưa vào mô hình nhằm đảm bảo tính ổn định và dễ phân tích.

Ưu điểm của RSM là cho phép:

- Dự đoán đầu ra tương ứng với bất kỳ tổ hợp giá trị đầu vào nào trong phạm vi khảo sát;
- Phân tích ảnh hưởng riêng lẻ và tương tác của các biến đầu vào;
- Tối ưu hóa đơn hoặc đa mục tiêu với chi phí thực nghiệm thấp.

Trong các phần tiếp theo, các mô hình hồi quy bậc hai sẽ được xây dựng cho từng hàm mục tiêu dựa trên dữ liệu thực nghiệm thu được từ thiết kế BBK . Độ phù hợp của mô hình sẽ được kiểm tra bằng phương pháp phân tích phương sai ($ANOVA$) và các chỉ số thống kê đánh giá mô hình.

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

Để đánh giá chất lượng các mô hình hồi quy bậc hai thu được từ phương pháp RSM , phân tích phương sai ($ANOVA$) và các chỉ số thống kê như hệ số xác định R^2 và $R^2_{adjusted}$, cùng giá trị p của từng hệ số hồi quy đã được sử dụng. Các kết quả phân tích $ANOVA$ cho ba mô hình Ra , MRR và HWR được trình bày như sau:

Mô hình độ nhám bề mặt (Ra)

Kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho độ nhám bề mặt (Ra) được minh họa thông qua ảnh chụp màn hình kết quả xử lý từ phần mềm $MATLAB$, như thể hiện trong Hình 3.1. Hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai trình bày đầy đủ các hệ số hồi quy, giá trị p tương ứng và các chỉ tiêu đánh giá mức độ phù hợp của mô hình (R^2 và R^2 hiệu chỉnh).

Dựa trên các giá trị p , có thể xác định các thông số và tương tác có ảnh hưởng thống kê đáng kể đến độ nhám bề mặt trong miền khảo sát, đồng thời khẳng định tính phù hợp của mô hình hồi quy bậc hai được sử dụng để mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và Ra .

Bảng 3.1 trình bày các hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình Ra (μm) (thu được từ chương trình $Matlab$ – Hình 3.1).

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.

```

=== HỒI QUY BẬC HAI CHO Ra ===

R-squared: 0.7868
R-squared (Adjusted): 0.6163

=== Các hệ số mô hình ===
(Intercept)      -4.228181 (p = 0.7948)
A                 0.451049 (p = 0.7807)
Ton              0.952503 (p = 0.2576)
Toff             0.326955 (p = 0.6943)
IP              -1.589785 (p = 0.0189)
SV              2.117619 (p = 0.5676)
A:Ton           -0.060358 (p = 0.2730)
A:Toff          0.009798 (p = 0.8571)
A:IP            -0.025154 (p = 0.5645)
A:SV            0.187362 (p = 0.3926)
Ton:Toff        -0.006458 (p = 0.8151)
Ton:IP          0.093013 (p = 0.0003)
Ton:SV         -0.147605 (p = 0.1889)
Toff:IP        -0.009420 (p = 0.6702)
Toff:SV        0.036587 (p = 0.7406)
IP:SV          0.024128 (p = 0.7848)
A^2            -0.077797 (p = 0.3965)
Ton^2          -0.026024 (p = 0.1718)
Toff^2         -0.016299 (p = 0.3866)
IP^2           0.037635 (p = 0.0039)
SV^2          -0.160399 (p = 0.5926)

=== Phương trình hồi quy Ra (µm) ===
-4.2282 + 0.4510*A + 0.9525*Ton + 0.3270*Toff - 1.5898*IP + 2.1176*SV - 0.0604
*A*Ton + 0.0098*A*Toff - 0.0252*A*IP + 0.1874*A*SV - 0.0065*Ton*Toff + 0.0930
*Ton*IP - 0.1476*Ton*SV - 0.0094*Toff*IP + 0.0366*Toff*SV + 0.0241*IP*SV - 0.0778
*A^2 - 0.0260*Ton^2 - 0.0163*Toff^2 + 0.0376*IP^2 - 0.1604*SV^2

=== Ghi chú ===
A = Biên độ rung (µm), Ton = Thời gian phát xung (µs), Toff = Thời gian ngừng phát
xung (µs)
IP = Dòng điện xung (A), SV = Điện áp xung (V)

```

Hình 3.1 Ảnh chụp màn hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho Ra thu được từ phần mềm MATLAB

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 thời gian phát xung và dòng điện đối với chất lượng bề mặt.

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

Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p
(Intercept)	-4,2282	0,7948
A	0,4510	0,7807
T_{on}	0,9525	0,2576
T_{off}	0,3270	0,6943
IP	-1,5898	0,0189
SV	2,1176	0,5676

Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p
$A \times T_{on}$	-0,0604	0,2730
$A \times T_{off}$	0,0098	0,8571
$A \times I_p$	-0,0252	0,5645
$A \times SV$	0,1874	0,3926
$T_{on} \times T_{off}$	-0,0065	0,8151
$T_{on} \times I_p$	0,0930	0,0003
$T_{on} \times SV$	-0,1476	0,1889
$T_{off} \times IP$	-0,0094	0,6702
$T_{off} \times SV$	0,0366	0,7406
$I_p \times SV$	0,0241	0,7848
A^2	-0,0778	0,3965
T_{on}^2	-0,0260	0,1718
T_{off}^2	-0,0163	0,3866
I_p^2	0,0376	0,0039
SV^2	-0,1604	0,5926

Mô hình tốc độ bóc tách vật liệu (MRR)

Kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho năng suất bóc tách vật liệu (MRR) được trình bày trực quan thông qua ảnh chụp màn hình kết quả xử lý từ phần mềm *MATLAB*, như thể hiện trong Hình 3.2. Hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho thấy các hệ số hồi quy, giá trị p của từng thành phần và các chỉ tiêu đánh giá độ phù hợp của mô hình (R^2 và R^2 hiệu chỉnh).

Việc phân tích giá trị p cho phép nhận diện các thông số chi phối chính đối với MRR , đồng thời xác nhận khả năng mô tả xu hướng biến thiên của MRR bằng mô hình hồi quy bậc hai trong miền khảo sát của nghiên cứu.

Bảng 3.2 trình bày các hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình MRR (g/h) (thu được từ chương trình *Matlab* – Hình 3.2).

Mô hình cho MRR thể hiện chất lượng rất cao với:

$R^2 = 0,9250$ và $R_{adjusted}^2 = 0,8649$ cho thấy hơn 92% độ biến thiên của MRR được giải thích bởi mô hình.

Các yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến MRR bao gồm biên độ rung siêu âm (A) với $p = 0,0004$ và dòng điện xung (I_p) với $p = 0,0487$.

Ngoài ra, thành phần bậc hai của A và I_p cũng có ý nghĩa thống kê rõ rệt: $p < 0,0005$ phản ánh ảnh hưởng phi tuyến mạnh của hai biến này đến tốc độ bóc tách vật liệu.

=== HỒI QUY BẬC HAI CHO MRR ===

R-squared: 0.9250
R-squared (Adjusted): 0.8649

=== Các hệ số mô hình ===

Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p
(Intercept)	-8.135025	(p = 0.5389)
A	5.333043	(p = 0.0004)
Ton	0.379326	(p = 0.5750)
Toff	-0.362367	(p = 0.5921)
IP	1.065316	(p = 0.0487)
SV	-0.840398	(p = 0.7794)
A:Ton	-0.042658	(p = 0.3385)
A:Toff	-0.025498	(p = 0.5650)
A:IP	0.016656	(p = 0.6381)
A:SV	-0.036659	(p = 0.8357)
Ton:Toff	-0.028141	(p = 0.2163)
Ton:IP	0.005074	(p = 0.7773)
Ton:SV	-0.030605	(p = 0.7330)
Toff:IP	0.001766	(p = 0.9215)
Toff:SV	0.126026	(p = 0.1679)
IP:SV	-0.007910	(p = 0.9122)
A ²	-0.643700	(p = 0.0000)
Ton ²	0.023775	(p = 0.1260)
Toff ²	0.001050	(p = 0.9448)
IP ²	-0.039121	(p = 0.0004)
SV ²	-0.018827	(p = 0.9382)

=== Phương trình hồi quy MRR (g/h) ===

$$-8.1350 + 5.3330*A + 0.3793*Ton - 0.3624*Toff + 1.0653*IP - 0.8404*SV - 0.0427*A*Ton - 0.0255*A*Toff + 0.0167*A*IP - 0.0367*A*SV - 0.0281*Ton*Toff + 0.0051*Ton*IP - 0.0306*Ton*SV + 0.0018*Toff*IP + 0.1260*Toff*SV - 0.0079*IP*SV - 0.6437*A^2 + 0.0238*Ton^2 + 0.0011*Toff^2 - 0.0391*IP^2 - 0.0188*SV^2$$

=== Ghi chú ===

A = Biên độ rung (μm), Ton = Thời gian phát xung (μs), Toff = Thời gian ngừng phát xung (μs)
IP = Dòng điện xung (A), SV = Điện áp xung (V)

Hình 3.2 Ảnh chụp màn hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho MRR thu được từ phần mềm MATLAB

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
(Intercept)	-8,1350	0,5389
A	5,3330	0,0004
T_{on}	0,3793	0,5750
T_{off}	-0,3624	0,5921
I_p	1,0653	0,0487
SV	-0,8404	0,7794
$A \times T_{on}$	-0,0427	0,3385
$A \times T_{off}$	-0,0255	0,5650
$A \times I_p$	0,0167	0,6381
$A \times SV$	-0,0367	0,8357
$T_{on} \times T_{off}$	-0,0281	0,2163
$T_{on} \times I_p$	0,0051	0,7773
$T_{on} \times SV$	-0,0306	0,7330

Thành phần mô hình	Hệ số	Giá trị p
$T_{off} \times I_p$	0,0018	0,9215
$T_{off} \times SV$	0,1260	0,1679
$I_p \times SV$	-0,0079	0,9122
A^2	-0,6437	0,0000
T_{on}^2	0,0238	0,1260
T_{off}^2	0,0011	0,9448
I_p^2	-0,0391	0,0004
SV^2	-0,0188	0,9382

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

Kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho chỉ tiêu mòn điện cực theo phương đứng (HWR) được trình bày trực quan thông qua ảnh chụp màn hình kết quả xử lý từ phần mềm *MATLAB*, như thể hiện trong Hình 3.3.

Hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho thấy đầy đủ các hệ số hồi quy, giá trị p tương ứng của từng thành phần, cùng các chỉ tiêu đánh giá độ phù hợp của mô hình (R^2 và R^2 hiệu chỉnh). Thông qua các giá trị p , có thể nhận diện các thông số và tương tác có ảnh hưởng thống kê đáng kể đến HWR trong miền khảo sát, đồng thời khẳng định tính phù hợp của mô hình hồi quy bậc hai được sử dụng trong nghiên cứu.

```

=== HỒI QUY BẬC HAI CHO HWR ===

R-squared: 0.8166
R-squared (Adjusted): 0.6699

=== Các hệ số mô hình ===
(Intercept)      8.557770      (p = 0.0479)
A                 0.129824      (p = 0.7541)
Ton              -0.359404      (p = 0.0999)
Toff             -0.521231      (p = 0.0203)
IP               0.168061      (p = 0.3093)
SV              -1.445947      (p = 0.1346)
A:Ton            0.009390      (p = 0.5016)
A:Toff          -0.019630      (p = 0.1665)
A:IP            -0.002991      (p = 0.7883)
A:SV            -0.008147      (p = 0.8836)
Ton:Toff        -0.010583      (p = 0.1425)
Ton:IP          -0.008376      (p = 0.1466)
Ton:SV          0.003274      (p = 0.9077)
Toff:IP         -0.002519      (p = 0.6562)
Toff:SV         0.076809      (p = 0.0110)
IP:SV           0.000300      (p = 0.9894)
A^2             0.010304      (p = 0.6589)
Ton^2           0.017944      (p = 0.0008)
Toff^2          0.013469      (p = 0.0087)
IP^2            0.001288      (p = 0.6743)
SV^2            0.054952      (p = 0.4746)

=== Phương trình hồi quy HWR (mm/h) ===
8.5578 + 0.1298*A - 0.3594*Ton - 0.5212*Toff + 0.1681*IP - 1.4459*SV + 0.0094
*A*Ton - 0.0196*A*Toff - 0.0030*A*IP - 0.0081*A*SV - 0.0106*Ton*Toff - 0.0084
*Ton*IP + 0.0033*Ton*SV - 0.0025*Toff*IP + 0.0768*Toff*SV + 0.0003*IP*SV + 0.0103
*A^2 + 0.0179*Ton^2 + 0.0135*Toff^2 + 0.0013*IP^2 + 0.0550*SV^2

=== Ghi chú ===
A = Biên độ rung (µm), Ton = Thời gian phát xung (µs), Toff = Thời gian ngừng phát
xung (µs)
IP = Dòng điện xung (A), SV = Điện áp xung (V)

```

Hình 3.3 Ảnh chụp màn hình kết quả phân tích hồi quy bậc hai cho HWR thu được từ phần mềm *MATLAB*

Bảng 3.3 trình bày các hệ số hồi quy và giá trị p cho mô hình HWR (mm/h) (thu được từ chương trình *Matlab* – Hình 3.3). Mô hình HWR có mức độ phù hợp trung bình, với:

$$R^2 = 0,8166 \text{ và } R_{adjusted}^2 = 0,6699.$$

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_{on} 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.

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

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

Tổng quan đánh giá mô hình:

Ba mô hình hồi quy bậc hai được xây dựng cho các hàm mục tiêu Ra , MRR và HWR đã phản ánh được phần lớn xu hướng thay đổi của dữ liệu thực nghiệm trong

không gian thiết kế khảo sát. Mô hình dự đoán MRR đạt chất lượng rất cao với hệ số xác định $R^2 = 0,9250$ và $R^2_{adjusted} = 0,8649$ cho thấy khả năng mô tả tốt mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và tốc độ bóc tách vật liệu. Các yếu tố A và I_p được xác định là có ảnh hưởng đáng kể và mang tính phi tuyến đến MRR .

Tuy nhiên, đối với mô hình Ra và HWR , hệ số xác định hiệu chỉnh lần lượt chỉ đạt $R^2_{adjusted} = 0,6163$ và $R^2_{adjusted} = 0,6699$ cho thấy mức độ phù hợp của mô hình ở mức trung bình và tồn tại độ sai lệch đáng kể giữa giá trị dự đoán và thực nghiệm, đặc biệt trong các vùng có tương tác mạnh hoặc phi tuyến cao giữa các biến.

Những hạn chế này cho thấy mô hình RSM không hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu về độ chính xác trong dự đoán Ra và HWR . Do đó, trong các mục tiếp theo, mô hình *Gaussian Process Regression (GPR)* (Mục 3.3) sẽ được áp dụng như một giải pháp nâng cao nhằm cải thiện chất lượng mô hình hóa và tối ưu hóa hai đại lượng đầu ra này. GPR , với khả năng mô tả tốt các mối quan hệ phi tuyến và cung cấp dự đoán cùng độ bất định tương ứng, được kỳ vọng sẽ cho kết quả chính xác và ổn định hơn trong trường hợp 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 (biên độ rung A , thời gian phát xung T_{on} , thời gian ngắt T_{off} , dòng điện xung I_p , điện áp 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)

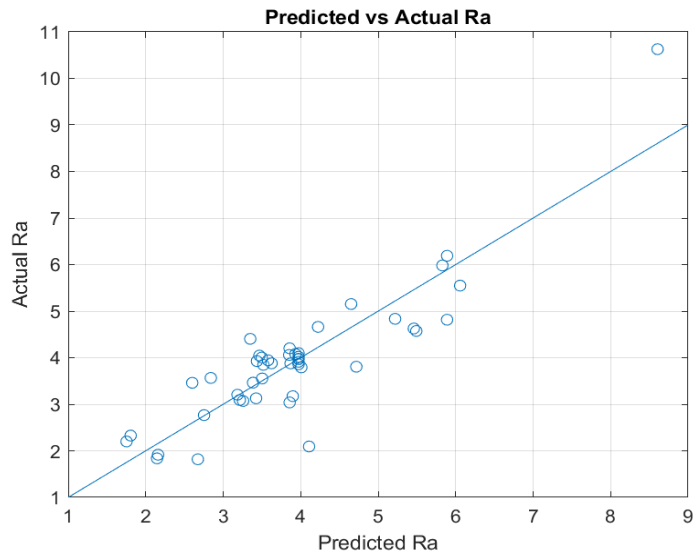
Phương trình hồi quy bậc hai cho Ra (μm) như sau:

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

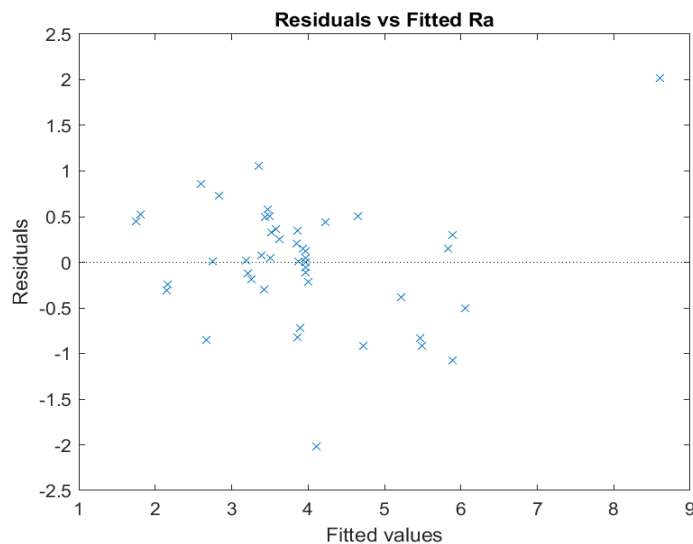
Độ phù hợp của mô hình được minh họa bằng đồ thị so sánh giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm (Hình 3.4) cùng biểu đồ phần dư (*residuals*) (Hình 3.5).

Hình 3.4 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 3.4 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

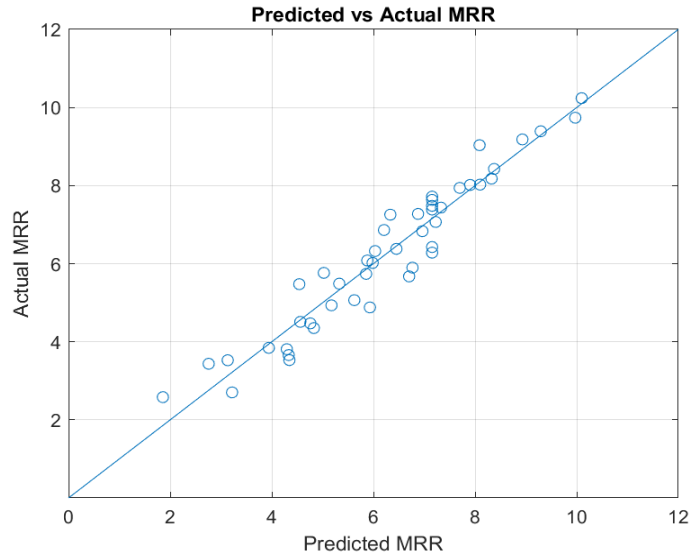
Hình 3.5 cũng có đánh giá này khi phần dư phân bố ngẫu nhiên quanh trục zero và không xuất hiện xu hướng hay hiện tượng phương sai thay đổi. Những quan sát này cho thấy mô hình có độ phù hợp thống kê và độ tin cậy trung bình để sử dụng trong phân tích và dự báo Ra trong phạm vi nghiên cứu.

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

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

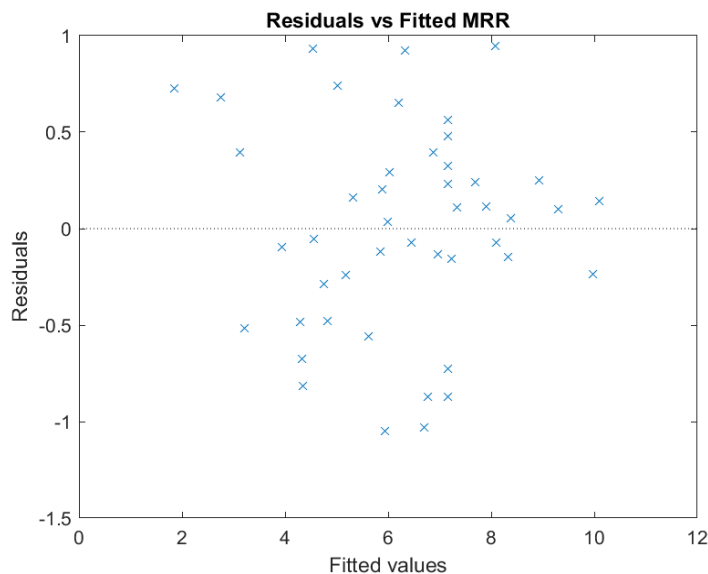
$$\begin{aligned}
 MRR = & -8.1350 + 5.3330A + 0.3793Ton - 0.3624Toff + 1.0653IP - 0.8404SV \\
 & - 0.0427A \cdot Ton - 0.0255A \cdot Toff + 0.0167A \cdot IP - 0.0367A \cdot SV \\
 & - 0.0281Ton \cdot Toff + 0.0051Ton \cdot IP - 0.0306Ton \cdot SV \\
 & + 0.0018Toff \cdot IP + 0.1260Toff \cdot SV - 0.0079IP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

Chất lượng mô hình thể hiện tốt qua đồ thị Hình 3.6 và Hình 3.7: 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 qua sự phân bố của các điểm dữ liệu dọc theo đường chéo trên đồ thị *Predicted–Actual*.



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

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. Nhìn chung, mô hình xây dựng có độ tin cậy tốt và phù hợp cho việc phân tích cũng như dự đoán *MRR* trong miền khảo sát.



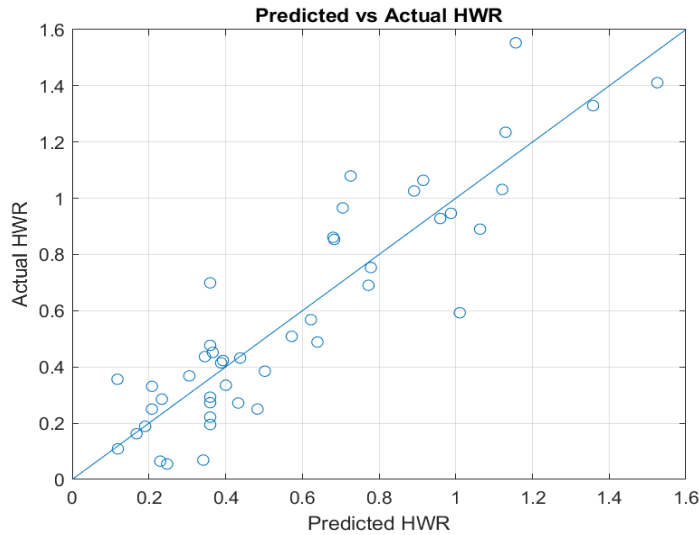
Hình 3.7 Phân bố phần dư theo giá trị dự đoán của *MRR*

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

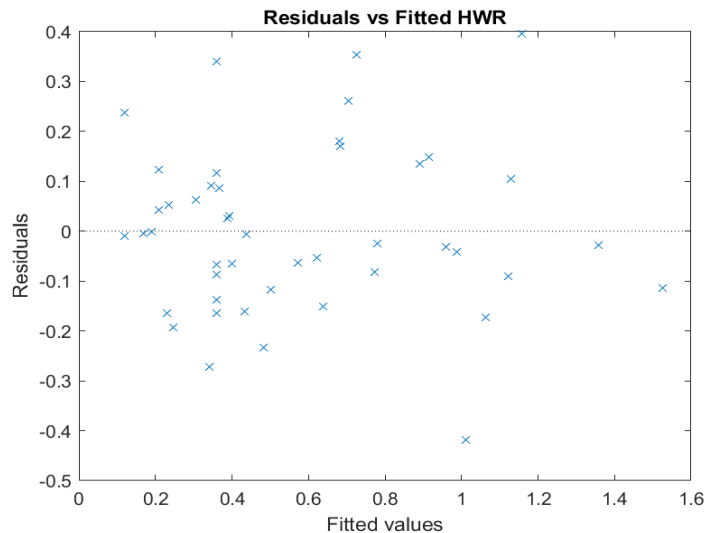
Phương trình hồi quy bậc hai cho *HWR* (mm/h):

$$\begin{aligned}
 HWR = & 8.5578 + 0.1298A - 0.3594Ton - 0.5212Toff + 0.1681IP - 1.4459SV \\
 & + 0.0094A \cdot Ton - 0.0196A \cdot Toff - 0.0030A \cdot IP - 0.0081A \cdot SV \\
 & - 0.0106Ton \cdot Toff - 0.0084Ton \cdot IP + 0.0033Ton \cdot SV \\
 & - 0.0025Toff \cdot IP + 0.0768Toff \cdot SV + 0.0003IP \cdot SV \\
 & + 0.0103A^2 + 0.0179Ton^2 + 0.0135Toff^2 + 0.0013IP^2 + 0.0550SV^2 \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

Mức độ phù hợp của mô hình *HWR* được đánh giá qua Hình 3.8 và Hình 3.9.



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*

Đồ thị quan hệ giữa giá trị dự đoán và thực nghiệm của *HWR* cho thấy các điểm dữ liệu phân bố tương đối gần đường chéo, phản ánh mức độ phù hợp chấp nhận được của mô hình trong miền khảo sát. Phân bố phần dư thể hiện sự dao động ngẫu nhiên quanh giá trị “0”, không xuất hiện xu hướng tăng – giảm hay thay đổi phương sai rõ rệt, nhờ đó các giả định cơ bản của mô hình hồi quy được đảm bảo. Giá trị

$R_{adjusted}^2 = 0,6699$ cho thấy mô hình chỉ giải thích được khoảng 67% biến thiên của HWR , thấp hơn đáng kể so với mô hình MRR ; điều này phù hợp với đặc tính biến động mạnh và khó dự đoán hơn của chỉ tiêu HWR trong gia công EDM .

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 [86]. *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.

Quy trình thực hiện *GPR* trong nghiên cứu:

Trong nghiên cứu này, quá trình thực hiện *GPR* được tiến hành qua các bước:

1. Tiền xử lý dữ liệu đầu vào và đầu ra:

Dữ liệu được chuẩn hóa và đầu ra được biến đổi bằng Box-Cox để giảm độ lệch phân phối, cải thiện tính tuyến tính.

2. Lựa chọn tập dữ liệu huấn luyện:

Dữ liệu gồm 46 điểm từ thiết kế *Box-Behnken* được sử dụng cho cả hai mô hình *GPR* – một cho MRR , một cho Ra .

3. Huấn luyện mô hình *GPR*: được trình bày cụ thể ở mục 3.3.2.

4. Đánh giá độ chính xác mô hình: được trình bày cụ thể ở mục 3.3.3.

Mô hình được kiểm định bằng hệ số tương quan R^2 , R_{adj}^2 , và kiểm tra trực quan giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán.

5. Sử dụng mô hình để dự đoán trong tối ưu hóa: được trình bày cụ thể ở mục 3.3.4 cho tối ưu đơn mục tiêu. Các mô hình *GPR* được tích hợp vào thuật toán *NSGA-II* để tìm ra các phương án tối ưu hóa đa mục tiêu (Chương 4).

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

Trong nghiên cứu này, việc lựa chọn hàm kernel và hàm cơ sở (*basis function*) cho mô hình *Gaussian Process Regression (GPR)* không được giả định trước, mà được thực hiện thông qua lập trình *MATLAB* nhằm đánh giá và so sánh có hệ thống nhiều cấu hình *GPR* khác nhau. Cụ thể, đối với từng chỉ tiêu đầu ra MRR , Ra và HWR , các mô hình *GPR* được xây dựng bằng cách kết hợp nhiều loại kernel (*Squared Exponential*, *Rational Quadratic*, *Matérn 3/2*, *Matérn 5/2*) với các hàm cơ sở (*constant*, *linear*, *pure quadratic*).

Quá trình này được thực hiện bằng chương trình *MATLAB* sử dụng hàm `fitrgp`, trong đó các siêu tham số của mô hình (*Sigma* và *KernelScale*) được tối ưu thông qua tối đa hóa hàm hợp lý biên (*log marginal likelihood*). 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.

```

=== GPR Ra Comparison (Kernel x Basis) ===
kernel      basis      R^2      R^2adj
squarexponential | constant | 0.9996 | 0.9996
squarexponential | linear   | 0.9907 | 0.9895
squarexponential | 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*

Kết quả so sánh các cấu hình *GPR* cho *Ra* được trình bày trong Hình 3.10, cho thấy 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*.

```

=== GPR MRR Comparison (Kernel x Basis) ===
kernel      basis      R^2      R^2adj
squarexponential | constant | 0.9375 | 0.9297
squarexponential | linear   | 0.9881 | 0.9866
squarexponential | 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*

Đối với *MRR*, kết quả so sánh các cấu hình *GPR* được thể hiện trong Hình 3.11. 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 năng suất bóc tách vật liệu. Tương tự, đối với *HWR*, kết quả đánh giá các cấu hình *GPR* được trình bày trong Hình 3.12. 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. Trên cơ sở đó, 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 mòn điện cực trong toàn bộ miền khảo sát.

```

=== GPR HWR Comparison (Kernel x Basis) ===
kernel      basis      R^2      R^2adj
squareexponential | constant | 0.9726 | 0.9691
squareexponential | linear   | 0.8940 | 0.8807
squareexponential | pureQuadratic | 0.9725 | 0.9691
rationalquadratic | constant | 0.9726 | 0.9691
rationalquadratic | linear   | 0.9726 | 0.9691
rationalquadratic | pureQuadratic | 0.7074 | 0.6708
matern32      | constant | 0.8727 | 0.8568
matern32      | linear   | 0.9686 | 0.9647
matern32      | pureQuadratic | 0.9726 | 0.9691
matern52      | constant | 0.8670 | 0.8504
matern52      | linear   | 0.9726 | 0.9691
matern52      | pureQuadratic | 0.9666 | 0.9624

```

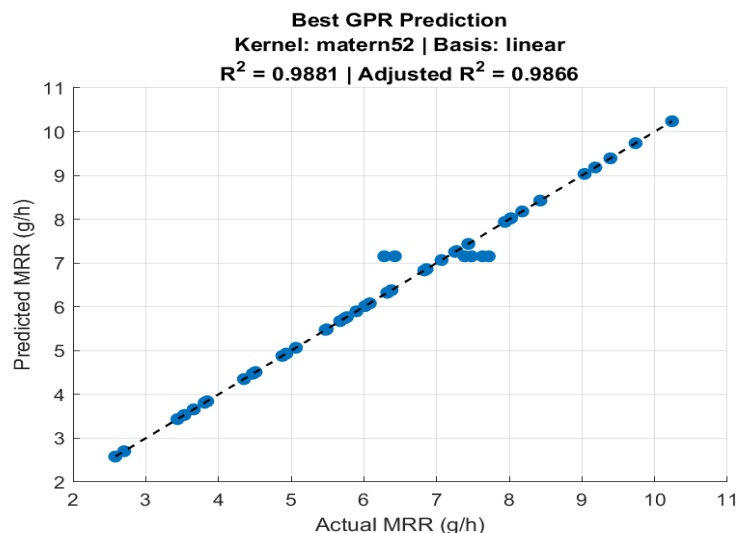
Hình 3.12 So sánh các cấu hình mô hình GPR cho HWR

3.3.3 Đánh giá độ chính xác mô hình

Sau khi lựa chọn cấu hình GPR tối ưu cho từng chỉ tiêu đầu ra thông qua lập trình *MATLAB*, độ chính xác của các mô hình được đánh giá bằng cách kết hợp chỉ tiêu thống kê và kiểm tra trực quan giữa giá trị thực nghiệm và giá trị dự đoán. Hai chỉ tiêu chính được sử dụng gồm hệ số xác định R^2 và hệ số xác định hiệu chỉnh R^2_{adj} , cho phép đánh giá mức độ phù hợp của mô hình cũng như khả năng khái quát hóa khi xét đến số lượng biến đầu vào.

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

Hình 3.10 trình bày mối quan hệ giữa giá trị MRR thực nghiệm và MRR dự đoán bởi mô hình GPR tối ưu, sử dụng kernel Matérn 5/2 kết hợp với hàm cơ sở tuyến tính. 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 khảo sát.



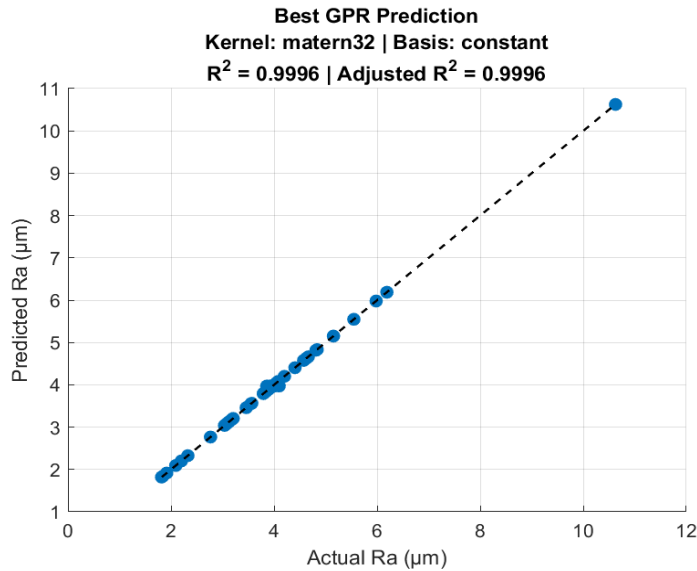
Hình 3.13 Mô hình GPR cho MRR

Giá trị hệ số xác định đạt: $R^2 = 0,9881$, $R^2_{adj} = 0,9866$. 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 năng suất bóc tách vật liệu. So với mô hình RSM đã trình bày ở Mục 3.2, độ chính

xác dự đoán MRR của GPR được cải thiện rõ rệt, đặc biệt tại các vùng có độ cong lớn của hàm mục tiêu.

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

Đối với độ nhám bề mặt, kết quả so sánh giữa giá trị Ra thực nghiệm và Ra dự đoán bằng mô hình GPR được trình bày trong Hình 3.14. 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.



Hình 3.14 Mô hình GPR cho Ra

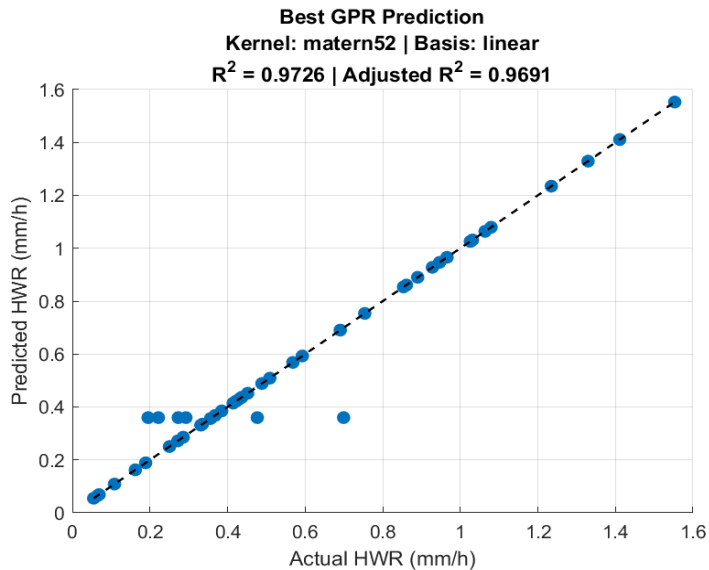
Các chỉ tiêu thống kê đạt: $R^2 = 0,9996$, $R^2_{adj} = 0,9996$. Giá trị R^2 và R^2_{adj} gần bằng 1 phản ánh khả năng mô hình hóa xuất sắc của GPR đối với chỉ tiêu Ra . Các điểm dữ liệu trong Hình 3.14 gần như trùng khớp với đường lý tưởng, cho thấy mô hình không chỉ có độ chính xác cao mà còn rất ổn định trong toàn miền khảo sát. Kết quả này khẳng định GPR đã khắc phục hoàn toàn những hạn chế của mô hình hồi quy bậc hai trong việc mô tả các tương tác phi tuyến phức tạp ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt.

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

Hình 3.15 thể hiện kết quả đánh giá độ chính xác của mô hình GPR cho chỉ tiêu HWR , với cấu hình tối ưu là *kernel Matérn 5/2* và hàm cơ sở tuyến tính. 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 của điện cực.

Các chỉ số thống kê đạt được: $R^2 = 0,9726$, $R^2_{adj} = 0,9691$. Mặc dù độ phân tán của dữ liệu HWR lớn hơn so với Ra , 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. So

với mô hình *RSM*, độ chính xác dự đoán *HWR* của *GPR* đã được cải thiện đáng kể, đặc biệt tại các vùng mòn thấp – nơi mô hình hồi quy truyền thống thường gặp khó khăn.



Hình 3.15 Mô hình GPR cho HWR

3.3.4 Tối ưu hóa đơn mục tiêu bằng mô hình GPR

Sau khi xây dựng và đánh giá độ chính xác của các mô hình *Gaussian Process Regression* (*GPR*) cho ba chỉ tiêu đầu ra *MRR*, *Ra* và *HWR*, các mô hình này tiếp tục được sử dụng để thực hiện tối ưu hóa đơn mục tiêu. Trong bước này, mỗi mô hình *GPR* đóng vai trò là hàm mục tiêu thay thế, cho phép xác định giá trị cực trị của từng chỉ tiêu trong miền khảo sát của các thông số công nghệ, đồng thời đảm bảo các ràng buộc vật lý đã đặt ra.

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

Đối với chỉ tiêu năng suất bóc tách vật liệu, bài toán tối ưu đơn mục tiêu được thiết lập nhằm tối đa hóa *MRR*. Mô hình *GPR* tối ưu cho *MRR* sử dụng hàm nhân *Matérn 5/2* (*matern52*) kết hợp với hàm cơ sở tuyến tính (*linear*), đạt độ chính xác cao với $R^2 = 0,9881$ và $R_{adj}^2 = 0,9866$.

```
Best GPR Model:
Kernel: matern52
Basis : linear
R^2      = 0.9881
Adjusted R^2 = 0.9866

Optimal input values for maximizing MRR:
A (µm) = 5.2000
Ton (µs) = 16.0000
Toff (µs) = 8.0000
IP (A) = 15.0000
SV (V) = 4.0000

Predicted maximum MRR = 10.6379 g/h
```

Hình 3.16 Kết quả tối ưu hóa đơn mục tiêu *MRR* dựa trên mô hình *GPR*

Kết quả tối ưu từ *MATLAB* (Hình 3.16) 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 (*Ra*)

Bài toán tối ưu đơn mục tiêu cho độ nhám bề mặt được xây dựng nhằm giảm thiểu *Ra*. Mô hình *GPR* tối ưu cho *Ra* 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 (Hình 3.17) cho thấy *Ra* nhỏ nhất dự đoán đạt 2,0407 μm tại bộ thông số công nghệ: $A = 2,938 \mu\text{m}$; $T_{on} = 8 \mu\text{s}$; $T_{off} = 12,083 \mu\text{s}$; $I_p = 5,7544 \text{ A}$; $SV = 4,7723 \text{ V}$.

```
Best GPR Model:
Kernel: matern32
Basis : constant
R^2          = 0.9996
Adjusted R^2 = 0.9996

Optimal input values for minimizing Ra:
A ( $\mu\text{m}$ ) = 2.9380
Ton ( $\mu\text{s}$ ) = 8.0000
Toff ( $\mu\text{s}$ ) = 12.0830
IP (A) = 5.7544
SV (V) = 4.7723

Predicted minimum Ra = 2.0407  $\mu\text{m}$ 
```

Hình 3.17 Kết quả tối ưu hóa đơn mục tiêu *Ra* dựa trên mô hình *GPR*

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

Đối với mòn điện cực, bài toán tối ưu đơn mục tiêu được thiết lập nhằm giảm thiểu *HWR*. Mô hình *GPR* tối ưu cho *HWR* sử dụng hàm nhân Matérn 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 (Hình 3.18) cho thấy *HWR* nhỏ nhất dự đoán đạt 0,0400 mm/h tại bộ thông số công nghệ: $A = 3,1863 \mu\text{m}$; $T_{on} = 15,8063 \mu\text{s}$; $T_{off} = 12,7397 \mu\text{s}$; $I_p = 8,0780 \text{ A}$; $SV = 4,0000 \text{ V}$. (Hình 3.18).

```
Best GPR Model:
Kernel: matern52
Basis : linear
R^2          = 0.9726
Adjusted R^2 = 0.9691

Optimal input values for minimizing HWR (HWR  $\geq$  0.045 mm/h):
A ( $\mu\text{m}$ ) = 3.1863
Ton ( $\mu\text{s}$ ) = 15.8063
Toff ( $\mu\text{s}$ ) = 12.7397
IP (A) = 8.0780
SV (V) = 4.0000

Predicted minimum HWR = 0.0400 mm/h
```

Hình 3.18 Kết quả tối ưu hóa đơn mục tiêu *HWR* dựa trên mô hình *GPR*

Từ các kết quả tối ưu hóa đơn mục tiêu bằng mô hình *GPR* có thể rút ra các nhận xét sau:

1. Mô hình *GPR* cho phép xác định nghiệm tối ưu đơn mục tiêu với độ chính xác dự đoán rất cao, đặc biệt đối với chỉ tiêu *Ra*.
2. Các nghiệm tối ưu đơn mục tiêu phản ánh rõ xu hướng đánh đổi giữa năng suất, chất lượng bề mặt và mòn điện cực.
3. Kết quả tối ưu đơn mục tiêu bằng *GPR* cung cấp các nghiệm biên quan trọng, làm cơ sở cho việc xây dựng và giải quyết bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu *Ra–MRR–HWR* trong Chương 4.

3.3.5 Kiểm chứng thực nghiệm

Để đánh giá các mô hình tìm được ở trên, thí nghiệm kiểm chứng đã được thực hiện với bộ thông số tối ưu trên quy tròn với các giá trị thực tế. Số liệu thí nghiệm và kết quả thu được như sau:

- 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* trong dự đoán *MRR*.

- 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* trong dự đoán độ nhám bề mặt.

- 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

Để đánh giá vai trò và mức độ ảnh hưởng của từng thông số công nghệ đầu vào đến các chỉ tiêu đầu ra trong quá trình gia công xung điện có hỗ trợ rung động siêu âm, nghiên cứu này sử dụng mô hình hồi quy bậc hai được xây dựng bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (*RSM*) làm nền tảng phân tích. Các mô hình này không chỉ cho phép dự đoán giá trị đầu ra mà còn cung cấp thông tin định lượng về ảnh

hưởng của từng biến đầu vào, thông qua hệ số hồi quy và giá trị kiểm định thống kê (p -value). Việc phân tích ảnh hưởng các yếu tố đầu vào được thực hiện dựa trên 3 công cụ:

- Biểu đồ ảnh hưởng chính (Main Effect Plots)

Mô tả xu hướng thay đổi của một biến đầu ra khi từng thông số đầu vào thay đổi trong khi các biến còn lại giữ cố định ở giá trị trung tâm. Biểu đồ này giúp nhận diện nhanh chiều hướng ảnh hưởng (tăng hoặc giảm) của từng biến.

- Biểu đồ cột hiệu ứng (Effect Bar Plots)

Thể hiện độ lớn tương đối của ảnh hưởng giữa các biến đầu vào, cho phép so sánh trực quan biến nào có ảnh hưởng mạnh hơn đến đầu ra.

- Biểu đồ đường đồng mức (Contour Plots)

Được sử dụng để phân tích ảnh hưởng kết hợp của hai biến đầu vào đến một đầu ra, giúp làm rõ các tương tác có ý nghĩa giữa các cặp biến và xác định các vùng có điều kiện công nghệ tối ưu.

Ngoài ra, việc kiểm định độ ý nghĩa thống kê của từng thành phần trong mô hình được thực hiện thông qua phân tích phương sai (ANOVA). Các hệ số có giá trị $p < 0,05$ được xem là có ảnh hưởng đáng kể đến biến đầu ra ở mức ý nghĩa 95%. Từ đó, có thể nhận định được biến nào là quan trọng, biến nào có thể bỏ qua, cũng như bản chất tương tác tuyến tính hay phi tuyến giữa các yếu tố đầu vào và đầu ra.

3.4.2 Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến Ra

Độ nhám bề mặt (Ra) là một tiêu chí chất lượng bề mặt quan trọng trong gia công EDM, đặc biệt với các ứng dụng yêu cầu độ chính xác hình học và độ nhẵn cao. Phân tích hồi quy bậc hai (RSM) và các biểu đồ trực quan sau đây đã được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của từng thông số công nghệ đầu vào đến chỉ tiêu Ra .

a) Phân tích biểu đồ đường đồng mức độ nhám bề mặt Ra theo các cặp thông số công nghệ

Để hiểu rõ ảnh hưởng tương hỗ giữa các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt (Ra), các biểu đồ đường đồng mức (contour plots) (Hình 3.19) đã được xây dựng từ mô hình tối ưu hóa đơn mục tiêu.

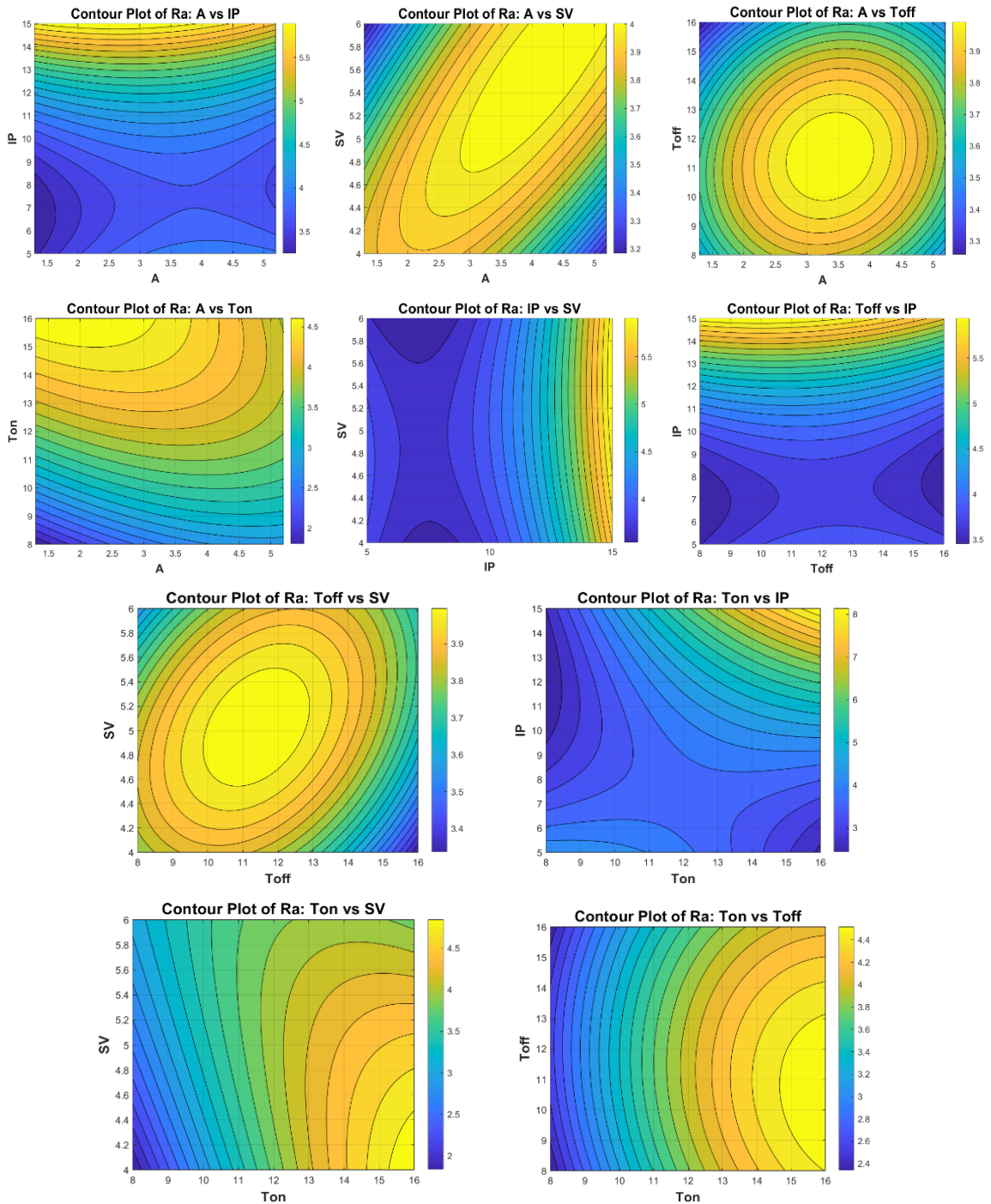
Các biểu đồ đường đồng mức thể hiện sự thay đổi của Ra theo từng cặp thông số trong khi giữ các thông số còn lại cố định tại mức trung bình. Dưới đây là phân tích chi tiết:

+) Ảnh hưởng kết hợp giữa biên độ rung (A) và dòng điện xung (I_p)

Biểu đồ cho thấy độ nhám Ra tăng đáng kể khi dòng điện xung I_p tăng. Trong khi đó, biên độ rung A có xu hướng ảnh hưởng yếu hơn, với Ra đạt mức thấp nhất tại $A \approx 3\div 4 \mu\text{m}$, trong đó I_p thể hiện mức độ chi phối rõ rệt hơn. Ra đạt giá trị thấp nhất

tại vùng I_p trung bình–thấp và A trung bình; ngược lại, tại I_p cao, Ra tăng mạnh do năng lượng phóng điện lớn làm hình thành các hố xói sâu. Điều này phản ánh hiệu ứng làm mịn bề mặt khi có rung động siêu âm, đặc biệt hiệu quả ở biên độ vừa phải.

Dòng điện I_p càng cao thì năng lượng xung càng lớn, gây nên sự bốc hơi và phun kim loại mạnh hơn, dẫn đến tăng độ nhám. Sự cong nhẹ của các đường đồng mức hàm ý tồn tại tương tác phi tuyến giữa A và I_p , nhưng không đủ mạnh để làm thay đổi xu hướng chính. Kết quả khẳng định I_p là tham số ảnh hưởng chủ đạo trong cặp khảo sát này.



Hình 3.19 Biểu đồ đường đồng mức kết hợp của Ra

+) Ảnh hưởng kết hợp giữa A và điện áp xung (SV)

Ra đạt giá trị thấp nhất tại vùng trung tâm của biểu đồ, khi $A \approx 3 \mu\text{m}$ và $SV \approx 4,7 \div 5 \text{ V}$, Cả 2 thông số đều có ảnh hưởng rõ rệt: SV điều khiển khe hở điện môi và điều kiện tái tạo điện môi giữa các xung, khi SV quá thấp không đủ kích hoạt phóng điện, SV tăng làm khe hở lớn hơn, giảm mật độ năng lượng tại điểm phóng điện, từ đó giảm năng lượng tập trung vào hố xói dẫn đến Ra giảm. Biên độ A tăng đến mức tối ưu giúp cải thiện khả năng loại bỏ mảnh vụn, nhưng tăng quá mức có thể làm mất cộng hưởng, giảm hiệu quả siêu âm.

+) A kết hợp với thời gian dừng xung (T_{off})

Biểu đồ cho thấy vùng cực đại tập trung ở trung tâm đồ thị. Xu hướng này phản ánh quan hệ phi tuyến và độ nhạy cao của Ra đối với cả hai biến trong miền lân cận cực đại. Cấu trúc đồng tâm đồng thời cho thấy sự tương tác rõ rệt giữa A và T_{off} , với ảnh hưởng của mỗi biến phụ thuộc đáng kể vào giá trị của biến còn lại. Ra đạt cực đại tại vùng giá trị A và T_{off} trung tâm, thể hiện bằng các vòng đồng mức khép kín. Khi A hoặc T_{off} lệch khỏi vùng này, Ra giảm dần, phản ánh đặc trưng phi tuyến và sự tồn tại của một miền cực đại trong không gian khảo sát. Đường đồng mức có hình elip cho thấy Ra thấp nhất tại $A \approx 3,3 \mu\text{m}$ và $T_{off} \approx 11 \mu\text{s}$, Khi T_{off} quá nhỏ, không đủ thời gian để vật liệu nguội và mảnh vụn thoát Ra khỏi vùng phóng điện, điện môi chưa kịp phục hồi dẫn đến nhám cao, Ngược lại, T_{off} quá lớn làm giảm tốc độ bóc tách, gây ảnh hưởng đến sự ổn định.

+) A kết hợp với thời gian phát xung (T_{on})

Biểu đồ đường đồng mức không xuất hiện cực trị nội bộ, phản ánh quan hệ tăng đơn điệu và phi tuyến giữa Ra với hai biến. Ra tăng rõ rệt theo cả hai thông số A và T_{on} , trong đó T_{on} là yếu tố chi phối mạnh hơn. T_{on} dài dẫn đến xung năng lượng cao, gây xâm thực mạnh vào bề mặt. Ra đạt giá trị thấp nhất tại vùng T_{on} nhỏ và A thấp-trung bình, trong khi T_{on} cao kết hợp với A lớn tạo Ra lớn do năng lượng phóng điện tăng mạnh và duy trì trong thời gian dài hơn. Sự dịch chuyển và dày đặc của các đường đồng mức ở vùng T_{on} cao cho thấy tồn tại tương tác dương giữa A và T_{on} , khiến ảnh hưởng của A trở nên mạnh hơn khi T_{on} tăng. Kết quả khẳng định cần ưu tiên kiểm soát T_{on} và kết hợp điều chỉnh A hợp lý để đạt được độ nhám bề mặt thấp. Vùng tối ưu của A nằm trong khoảng $3 \div 4 \mu\text{m}$.

+) I_p kết hợp với SV

Biểu đồ cho thấy I_p tăng dẫn đến Ra tăng mạnh theo, SV chỉ đóng vai trò điều tiết và ảnh hưởng rõ rệt ở vùng I_p thấp. Các đường đồng mức gần như thẳng đứng tại I_p cao khẳng định I_p là tham số chi phối, còn tác động của SV tương đối nhỏ và không làm thay đổi xu hướng chung. Do đó, kiểm soát I_p là yếu tố then chốt để giảm Ra . Vùng

giảm Ra cục bộ ở I_p thấp và SV trung–cao phản ánh tính phi tuyến nhẹ và sự tương tác yếu giữa hai biến. Về cơ lý, I_p quyết định năng lượng phóng điện và mức độ hình thành hồ xói, còn SV chỉ điều chỉnh khe hở điện môi trong phạm vi hạn chế.

+) T_{off} kết hợp với I_p

Biểu đồ thể hiện xu hướng tương tự như $A-I_p$:

Biểu đồ cho thấy độ nhám bề mặt Ra phụ thuộc chủ yếu vào I_p , thể hiện qua sự gia tăng rõ rệt của Ra khi I_p tăng trên toàn miền khảo sát, ảnh hưởng của T_{off} tương đối yếu hơn. I_p tăng làm năng lượng phóng điện mỗi xung gia tăng, hình thành các hồ xói sâu và thô hơn, trong khi T_{off} điều khiển quá trình khử ion và tái tạo điện môi, tạo điều kiện ổn định hồ quang tại một miền T_{off} tối ưu. Ở vùng I_p thấp–trung bình, Ra đạt giá trị nhỏ nhất tại các giá trị T_{off} trung gian, phản ánh mối quan hệ phi tuyến dạng parabol và sự tồn tại của tương tác I_p-T_{off} ở mức vừa phải. T_{off} ảnh hưởng đến Ra theo dạng parabol mở lên, để đạt Ra thấp cần ưu tiên kiểm soát I_p và lựa chọn T_{off} trung bình, đồng thời tránh vùng I_p cao nơi hiệu quả điều chỉnh của T_{off} trở nên hạn chế với giá trị tối ưu khoảng 11–12 μs .

+) T_{off} kết hợp với SV

Biểu đồ đồng mức cho thấy độ nhám bề mặt Ra đạt giá trị cực đại tại vùng T_{off} và SV trung bình, và giảm dần khi hai thông số này lệch khỏi miền trung tâm. Các đường đồng mức elip nghiêng phản ánh mối quan hệ phi tuyến bậc hai cùng sự tương tác rõ rệt giữa T_{off} và SV , trong đó ảnh hưởng của T_{off} lên Ra phụ thuộc đáng kể vào mức SV và ngược lại. T_{off} trung bình đảm bảo quá trình khử ion và tái tạo điện môi hiệu quả, còn SV trung bình duy trì khe hở phóng điện ổn định với mật độ năng lượng cao; sự kết hợp này tạo các hồ xói sâu hơn, làm tăng Ra . Khi T_{off} hoặc SV quá nhỏ hoặc quá lớn, năng lượng phóng điện trung bình bị suy giảm hoặc phân tán, dẫn đến Ra giảm. Do đó, để đạt được độ nhám bề mặt thấp, cần tránh lựa chọn vùng $T_{off}-SV$ trung bình và ưu tiên các tổ hợp thông số lệch khỏi miền cực đại này.

+) T_{on} kết hợp với I_p

Biểu đồ thể hiện rõ xu hướng Ra tăng mạnh theo cả hai chiều T_{on} và I_p , trong đó I_p là tham số chi phối mạnh hơn. Ra đạt giá trị nhỏ nhất tại vùng T_{on} và I_p thấp, trong khi vùng T_{on} cao kết hợp I_p cao tạo Ra lớn do năng lượng phóng điện gia tăng đáng kể. Dạng cong của các đường đồng mức phản ánh mối quan hệ phi tuyến và sự tồn tại của tương tác dương giữa T_{on} và I_p , ảnh hưởng của T_{on} trở nên rõ rệt hơn khi I_p tăng. I_p và T_{on} đều làm tăng năng lượng mỗi xung, dẫn đến hình thành các hồ xói sâu và bề mặt thô hơn. Do đó, để đạt Ra thấp cần ưu tiên giảm I_p và T_{on} , đặc biệt tại vùng T_{on} cao và I_p cao, Ra có thể vượt ngưỡng 7÷8 μm , cho thấy cần giới hạn hai thông số này để duy trì chất lượng bề mặt.

+) T_{on} kết hợp với SV

Biểu đồ đồng mức cho thấy Ra tăng gần như đơn điệu theo T_{on} , trong khi SV chỉ có tác dụng điều tiết, giúp giảm Ra rõ hơn ở vùng T_{on} thấp–trung bình. T_{on} quyết định thời gian duy trì kênh plasma và do đó quyết định mức năng lượng gây hình thành hồ xói, còn SV chủ yếu điều chỉnh khe hở điện môi và ổn định hồ quang. Ra nhỏ nhất thu được tại T_{on} thấp và SV trung bình–cao; T_{on} cao, đặc biệt kết hợp SV thấp, tạo Ra lớn do năng lượng phóng điện tăng mạnh. Vì vậy, việc tối ưu hóa Ra cần ưu tiên kiểm soát T_{on} và lựa chọn SV phù hợp nhằm ổn định khe hở điện môi, đồng thời tránh miền T_{on} – SV cao khi yêu cầu chất lượng bề mặt.

+) T_{on} kết hợp với T_{off}

Biểu đồ cho thấy độ nhám bề mặt Ra phụ thuộc đồng thời vào thời gian phát xung (T_{on}) và thời gian ngừng xung (T_{off}), trong đó T_{on} thể hiện vai trò chi phối rõ rệt. Sự đối xứng của các đường đồng mức gợi ý tồn tại điểm làm việc tối ưu trong vùng trung tâm biểu đồ. Ra tăng dần khi T_{on} tăng, khi đó năng lượng phóng điện tích lũy trên mỗi xung tăng dẫn đến hình thành các hồ xói sâu và bề mặt thô hơn. Ngược lại, ảnh hưởng của T_{off} có dạng phi tuyến: tồn tại một khoảng T_{off} trung bình tại đó Ra đạt giá trị lớn hơn, T_{off} quá nhỏ hoặc quá lớn đều làm Ra giảm do điều kiện phóng điện kém ổn định hoặc năng lượng trung bình bị phân tán. Ra đạt giá trị thấp nhất khi $T_{on} \approx 11 \div 12 \mu s$ và T_{off} cũng trong vùng tương tự. Kết quả cho thấy để đạt Ra thấp cần ưu tiên giảm T_{on} và lựa chọn T_{off} lệch khỏi miền tối ưu của Ra , nhằm hạn chế năng lượng phóng điện trong mỗi chu kỳ.

Nhận xét chung

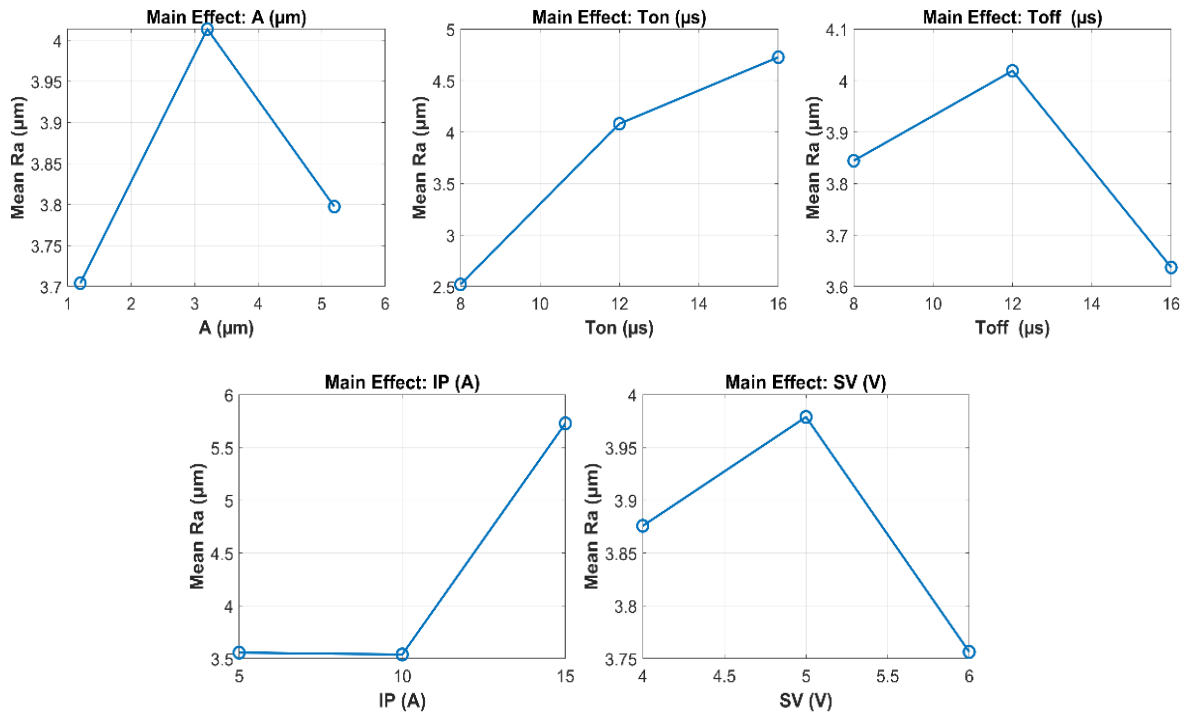
- I_p và T_{on} là 2 yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến độ nhám, khi tăng đều gây tăng Ra rõ rệt.
- Biên độ rung A có ảnh hưởng quan trọng, đặc biệt trong việc giảm Ra , nhưng cần được điều chỉnh trong phạm vi tối ưu ($\approx 3 \div 4 \mu m$).
- Các thông số SV và T_{off} ảnh hưởng vừa phải, chủ yếu giúp ổn định quá trình phóng điện và cải thiện điều kiện thoát mảnh vụn.
- Tổ hợp thông số tối ưu thường rơi vào vùng trung tâm biểu đồ, cho thấy mối tương tác phi tuyến giữa các thông số là rất rõ ràng.

b) Phân tích biểu đồ xu hướng chính của Ra theo từng thông số đầu vào

Biểu đồ xu hướng chính (*Main Effect Plots*) thể hiện ảnh hưởng riêng lẻ của từng thông số công nghệ đến giá trị trung bình của độ nhám bề mặt Ra . Biểu đồ này giúp nhận diện mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố và xác định vùng giá trị tối ưu để giảm Ra . Hình 3.20 thể hiện sự thay đổi của Ra trung bình khi thay đổi từng thông số, trong khi các thông số khác được giữ ở mức trung bình.

Ảnh hưởng của biên độ rung A

Biểu đồ cho thấy Ra tăng khi A tăng từ 1 lên 3 μm , sau đó giảm khi A tăng tiếp lên 5 μm . Điều này phản ánh đặc tính phi tuyến của ảnh hưởng từ biên độ rung. Mức $A = 3 \mu\text{m}$ có thể là giới hạn mà tại đó rung động bắt đầu tạo Ra hiệu ứng cộng hưởng làm tăng va đập không mong muốn, trong khi $A = 5 \mu\text{m}$ bắt đầu phát huy tác dụng làm mịn do tăng hiệu quả loại bỏ mảnh vụn. Biểu đồ ảnh hưởng chính của thông số A cho thấy độ nhám bề mặt Ra phụ thuộc phi tuyến vào A . Ra tăng khi A tăng từ mức thấp lên mức trung bình và đạt giá trị cực đại tại vùng A trung gian. Khi A tiếp tục tăng, Ra giảm nhẹ nhưng vẫn cao hơn so với trường hợp A thấp. Xu hướng này cho thấy việc tăng A đến mức trung bình làm tăng năng lượng tác động và hình thành các hố xói sâu, trong khi ở A lớn hơn, năng lượng phóng điện có xu hướng phân tán. Do đó, A trung bình là miền bất lợi đối với chất lượng bề mặt. Để giảm Ra , cần ưu tiên lựa chọn A thấp và phối hợp điều chỉnh với các thông số công nghệ khác.



Hình 3.20 Biểu đồ ảnh hưởng chính (Main Effect Plots) của các yếu tố đến Ra

Ảnh hưởng của thời gian phát xung T_{on}

Ra tăng tuyến tính rõ rệt theo sự gia tăng của T_{on} , từ khoảng 2,5 μm lên gần 4,8 μm khi T_{on} tăng từ 8 lên 16 μs . Điều này là do T_{on} lớn làm tăng năng lượng phóng điện mỗi xung, tạo Ra vết xói mòn sâu và rộng hơn trên bề mặt, gây nhám cao hơn. Biểu đồ ảnh hưởng chính của T_{on} cho thấy độ nhám bề mặt Ra tăng gần như đơn điệu khi T_{on} tăng trong toàn bộ phạm vi khảo sát. Ra tăng mạnh khi T_{on} tăng từ 8 lên 12 μs và tiếp tục tăng khi T_{on} tăng lên 16 μs , song với tốc độ chậm hơn. Xu hướng này phản ánh ảnh hưởng chi phối của T_{on} đến chất lượng bề mặt. T_{on} lớn kéo dài thời gian duy

trì kênh plasma, làm tăng năng lượng phóng điện trên mỗi xung và hình thành các hồ xói sâu hơn. Do đó, việc lựa chọn T_{on} thấp là cần thiết để hạn chế Ra . Trong thực tế, T_{on} cần được tối ưu kết hợp với các thông số khác nhằm đạt được bề mặt gia công mong muốn.

Ảnh hưởng của thời gian ngừng xung T_{off}

Biểu đồ ảnh hưởng chính của T_{off} cho thấy độ nhám bề mặt Ra biến thiên theo dạng phi tuyến. Ra tăng khi T_{off} tăng từ 8 lên 12 μs và đạt giá trị lớn nhất tại T_{off} trung bình. Khi T_{off} tiếp tục tăng lên 16 μs , Ra giảm đáng kể. Xu hướng này cho thấy tồn tại một miền T_{off} trung gian gây bất lợi cho chất lượng bề mặt. T_{off} trung bình tạo điều kiện phóng điện ổn định với năng lượng hiệu dụng cao, trong khi T_{off} lớn làm giảm năng lượng trung bình trên mỗi chu kỳ. Do đó, để giảm Ra cần tránh lựa chọn T_{off} ở vùng trung gian và tối ưu kết hợp với các thông số công nghệ khác.

Biểu đồ cho thấy Ra đạt cực đại tại $T_{off} = 12 \mu s$, và giảm xuống ở hai đầu (8 μs và 16 μs), Điều này có thể giải thích như sau:

- Khi T_{off} quá ngắn (8 μs), thời gian nghỉ không đủ, làm gia tăng hiện tượng gia nhiệt tích tụ và mảnh vụn không kịp thoát.
- Khi T_{off} quá dài (16 μs), quá trình xung điện Ra ít hơn, năng lượng trung bình giảm, dẫn đến mài mòn nhẹ hơn và bề mặt mịn hơn.

Ảnh hưởng của dòng điện xung I_p

Biểu đồ ảnh hưởng chính của dòng điện xung I_p cho thấy độ nhám bề mặt Ra ít thay đổi khi I_p tăng từ 5 A lên 10 A nhưng tăng mạnh khi I_p đạt 15 A. Xu hướng này phản ánh mối quan hệ phi tuyến và sự tồn tại của ngưỡng tác động của I_p đối với Ra , tại đó sự gia tăng I_p bắt đầu làm tăng độ phá hủy bề mặt đáng kể. I_p là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến Ra trong biểu đồ này. Ở vùng I_p thấp-trung bình, năng lượng phóng điện chưa đủ lớn để làm biến đổi đáng kể hình thái bề mặt. Khi I_p tăng cao, năng lượng đỉnh của xung tăng mạnh, tạo các hồ xói sâu và thô hơn, làm Ra tăng rõ rệt. Do đó, I_p là tham số chi phối mạnh cần được kiểm soát chặt chẽ. Để đạt Ra thấp, nên ưu tiên lựa chọn I_p ở mức thấp đến trung bình.

Ảnh hưởng của điện áp xung SV :

Ra tăng nhẹ từ $SV = 4$ lên $SV = 5$ V, sau đó giảm khi SV tiếp tục tăng lên 6 V. Điều này cho thấy có một mức điện áp tối ưu (≈ 5 V) tại đó phóng điện diễn ra mạnh nhưng ổn định. Khi SV tiếp tục tăng, hệ thống có thể đạt đến điều kiện dẫn điện ổn định hơn, làm giảm xung lượng đột ngột và bề mặt mịn hơn.

Biểu đồ ảnh hưởng chính của điện áp SV cho thấy độ nhám bề mặt Ra biến thiên theo dạng phi tuyến. Ra tăng khi SV tăng từ 4 lên 5 V và đạt giá trị lớn nhất tại SV trung bình. Khi SV tiếp tục tăng, hệ thống có thể đạt đến điều kiện dẫn điện ổn

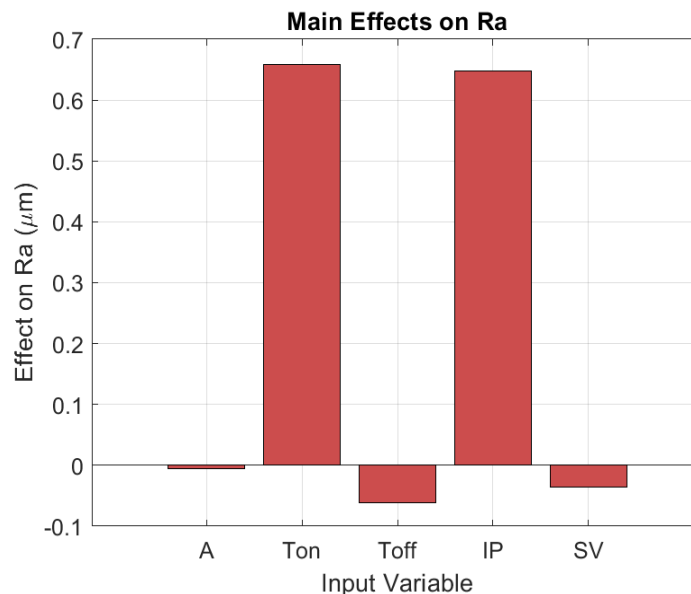
định hơn, làm giảm xung lượng đột ngột và bề mặt mịn hơn. Khi SV tăng lên 6 V, Ra giảm rõ rệt, cho thấy vai trò điều tiết của SV đối với chất lượng bề mặt. SV trung bình tạo điều kiện phóng điện tập trung với mật độ năng lượng cao, trong khi SV lớn làm tăng khe hở gia công và phân tán năng lượng. Do đó, SV trung bình là miền bất lợi cho chất lượng bề mặt. Để giảm Ra , nên tránh lựa chọn SV quanh giá trị trung bình và tối ưu kết hợp với các thông số công nghệ khác.

Nhận xét tổng quan:

- Thông số I_p và T_{on} ảnh hưởng mạnh nhất, cần được kiểm soát nghiêm ngặt để duy trì Ra thấp.
- Thông số T_{off} và SV có ảnh hưởng phi tuyến, biểu hiện bằng đường cong có cực trị, nên cần chọn giá trị tối ưu thay vì chỉ tăng hoặc giảm.
- Biên độ rung A ảnh hưởng ở mức trung bình, với điểm tối ưu nằm khoảng 5 μm .

c) Phân tích biểu đồ cột ảnh hưởng chuẩn hóa đến độ nhám bề mặt Ra

Biểu đồ cột Hình 3.21 thể hiện ảnh hưởng chuẩn hóa của từng thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt Ra (tính theo sự thay đổi trung bình của Ra khi thông số biến thiên trong miền khảo sát). Đây là một phương pháp trực quan để so sánh mức độ ảnh hưởng tương đối giữa các biến đầu vào.



Hình 3.21 Biểu đồ cột hiệu ứng chính đến Ra

Dòng điện xung (I_p) và thời gian phát xung (T_{on})

Hai thông số I_p và T_{on} có ảnh hưởng lớn nhất đến Ra , với biên độ ảnh hưởng vào khoảng 0,65 μm , cao hơn nhiều so với các thông số khác. Điều này phù hợp với cả biểu đồ đường đồng mức và biểu đồ xu hướng chính:

- I_p cao làm tăng năng lượng mỗi xung điện, gây phun kim loại mạnh và tăng độ nhám.

- T_{on} dài làm tăng thời gian xung, kéo dài thời gian vật liệu bị nung chảy, cũng dẫn đến bề mặt thô hơn.

Hai yếu tố này quyết định phần lớn sự biến thiên của giá trị Ra trong miền khảo sát.

T_{off} , SV và A :

Các thông số T_{off} , SV và biên độ A có ảnh hưởng rất nhỏ (gần bằng “0” hoặc âm nhẹ):

- T_{off} có ảnh hưởng âm nhẹ: khi tăng thời gian dừng xung, Ra giảm. Điều này là hợp lý vì T_{off} lớn giúp chất điện môi có thời gian hồi phục và làm mát, giảm độ thô bề mặt.
- SV cũng có ảnh hưởng âm nhẹ: tăng điện áp xung vượt mức tối ưu giúp ổn định phóng điện và làm mịn bề mặt.
- Biên độ rung A ảnh hưởng gần như bằng “0” trong thống kê chuẩn hóa này, có thể do ảnh hưởng phi tuyến của A không được phản ánh rõ ràng qua trị số trung bình.

3.4.3 Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến MRR

a) Phân tích biểu đồ đường đồng mức của MRR

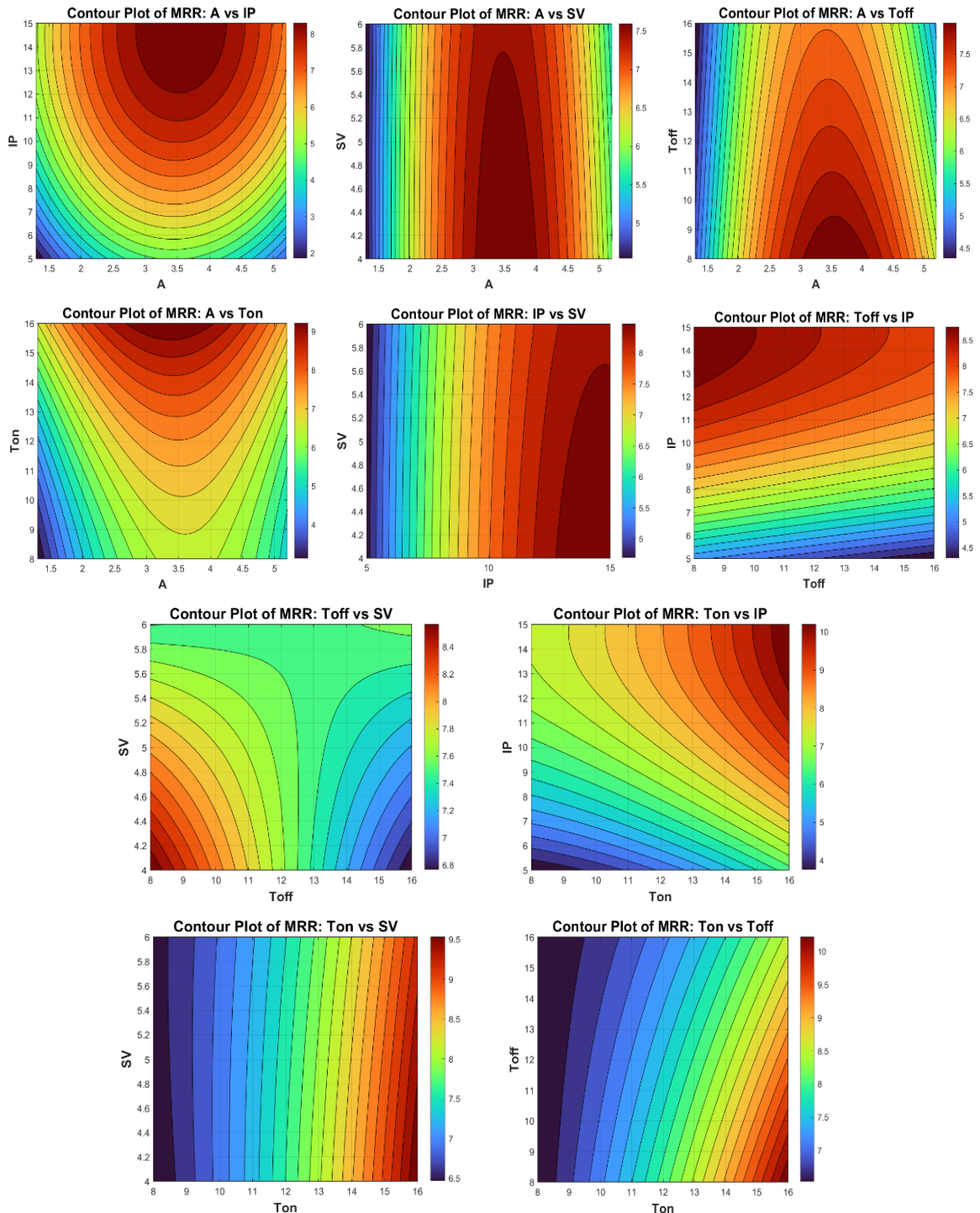
Các biểu đồ *contour* Hình 3.22 thể hiện ảnh hưởng tương hỗ giữa từng cặp thông số công nghệ đến MRR . Đây là chỉ tiêu quan trọng phản ánh hiệu quả của quá trình gia công $UV-EDM$. Kết quả mô phỏng cho phép nhận diện vùng thông số tối ưu để đạt MRR cao nhất.

Ảnh hưởng kết hợp giữa biên độ rung (A) và dòng điện xung (I_p)

MRR tăng rõ rệt khi I_p tăng và đạt cực đại tại vùng $A \approx 3,3 \div 3,8 \mu\text{m}$. Biểu đồ dạng hình parabol ngược cho thấy tác động cộng hưởng giữa A và I_p . Dòng điện xung cao cung cấp nhiều năng lượng, còn biên độ rung tối ưu giúp chất điện môi được khuấy trộn mạnh, tăng hiệu quả bóc tách. Biểu đồ cho thấy tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng mạnh theo dòng điện xung I_p , khẳng định đây là tham số chi phối chủ đạo của quá trình. Ảnh hưởng của thông số A biểu hiện tính phi tuyến bậc hai, trong đó MRR đạt cực đại tại vùng giá trị trung bình và suy giảm khi A quá nhỏ hoặc quá lớn.

Các đường đồng mức cong phản ánh sự tương tác rõ rệt giữa A và I_p , thể hiện ở việc hiệu quả nâng cao MRR của A chỉ được phát huy mạnh khi I_p nằm ở mức cao. Về cơ chế hình thành phóng điện, I_p lớn làm tăng năng lượng truyền vào vùng gia công, trong khi A ở mức trung bình giúp phân bố năng lượng ổn định và hiệu quả hơn. Do đó, vùng tổ hợp I_p cao và A trung bình mang lại MRR lớn nhất, phù hợp cho các điều kiện gia công thô. Tuy nhiên, việc lựa chọn các giá trị này cần được cân nhắc

đồng thời với yêu cầu về chất lượng bề mặt trong khuôn khổ bài toán tối ưu đa mục tiêu.



Hình 3.22 Biểu đồ đường đồng mức kết hợp của MRR

Ảnh hưởng kết hợp giữa A và điện áp xung (SV)

MRR đạt cực đại tại $SV \approx 5$ V và $A \approx 3,3$ μm . Cả hai yếu tố đều có xu hướng tăng MRR khi tiếp cận giá trị tối ưu, sau đó giảm dần nếu vượt ngưỡng. Điều này phản ánh đặc tính phi tuyến và giới hạn ổn định của vùng phóng điện. Biểu đồ cho thấy MRR phụ thuộc chủ yếu vào thông số A , trong khi SV chỉ đóng vai trò điều tiết.

MRR đạt giá trị lớn nhất tại vùng A trung bình–cao và giảm khi A quá thấp hoặc quá cao do phân bố năng lượng phóng điện kém tối ưu. Ảnh hưởng của SV tương đối yếu, chủ yếu giúp ổn định khe hở phóng điện và hỗ trợ duy trì MRR . Các đường đồng mức gần song song theo trục SV cho thấy tương tác $A-SV$ tồn tại nhưng không đáng kể. Kết quả khẳng định A là tham số chi phối chính đối với MRR .

A kết hợp với thời gian ngừng xung (T_{off})

MRR tăng theo biên độ A đến khoảng $3,3 \mu\text{m}$ rồi giảm, trong khi ảnh hưởng của T_{off} thể hiện rất rõ: MRR cao nhất tại $T_{off} \approx 10-12 \mu\text{s}$. Giá trị này cân bằng giữa việc làm mát hiệu quả và duy trì tốc độ phóng điện cao. MRR phụ thuộc mạnh vào thông số A , trong khi T_{off} đóng vai trò điều tiết thứ yếu. MRR đạt giá trị cực đại tại vùng A trung bình, thể hiện qua các dải đồng mức tập trung quanh khu vực trung tâm theo trục A . Khi A quá nhỏ hoặc quá lớn, MRR giảm do năng lượng phóng điện không được phân bố tối ưu trong vùng gia công. Ảnh hưởng của T_{off} thể hiện theo xu hướng phi tuyến nhẹ, trong đó T_{off} trung bình hỗ trợ duy trì điều kiện phóng điện ổn định và góp phần nâng cao MRR . Các đường đồng mức kéo dài theo phương T_{off} cho thấy tương tác $A-T_{off}$ tồn tại nhưng không mạnh, khẳng định A là tham số chi phối chính đối với MRR trong cặp khảo sát này.

A kết hợp với thời gian phát xung (T_{on})

Biểu đồ cho thấy T_{on} tăng giúp tăng MRR đáng kể, đặc biệt khi A nằm trong vùng cộng hưởng ($\approx 3,3 \mu\text{m}$). T_{on} lớn đồng nghĩa với thời gian gia công mỗi xung dài hơn, tăng lượng vật liệu bóc tách, nếu không gây hiện tượng tích nhiệt quá mức. Tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng theo cả thông số A và thời gian phát xung T_{on} , trong đó T_{on} thể hiện vai trò chi phối rõ rệt hơn. MRR đạt giá trị lớn nhất tại vùng A trung bình kết hợp với T_{on} cao, phản ánh sự phân bố năng lượng phóng điện tối ưu trong điều kiện duy trì xung dài. Khi A quá nhỏ hoặc quá lớn, MRR giảm do năng lượng phóng điện không được khai thác hiệu quả.

Các đường đồng mức cong cho thấy mối quan hệ phi tuyến và sự tồn tại của tương tác giữa A và T_{on} , trong đó ảnh hưởng của A trở nên rõ rệt hơn khi T_{on} tăng. Kết quả khẳng định việc phối hợp T_{on} cao với A phù hợp là yếu tố quan trọng để nâng cao MRR .

I_p kết hợp với SV

MRR tăng mạnh theo I_p , ít nhạy cảm hơn với SV . Đây là minh chứng rõ ràng rằng dòng điện xung là yếu tố chi phối tốc độ bóc tách, trong khi điện áp SV chủ yếu giúp ổn định hồ quang điện. Tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng mạnh theo I_p , trong khi ảnh hưởng của SV tương đối nhỏ và mang tính điều tiết. Các dải đồng mức gần song song theo trục SV khẳng định I_p là tham số chi phối chính đối với MRR . Khi I_p tăng,

năng lượng phóng điện tăng làm gia tăng đáng kể lượng vật liệu bị bóc tách. SV chỉ góp phần ổn định khe hở phóng điện và không làm thay đổi đáng kể xu hướng tăng của MRR theo I_p .

T_{off} kết hợp với I_p

Tương tự các biểu đồ trên, MRR đạt cao khi I_p lớn và T_{off} trong vùng 10–13 μs . T_{off} quá dài làm giảm số lần phóng điện trong một đơn vị thời gian, khiến MRR giảm. Tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng mạnh theo dòng điện xung I_p , trong khi ảnh hưởng của T_{off} mang tính điều tiết. MRR đạt giá trị cao nhất tại vùng I_p lớn kết hợp với T_{off} nhỏ–trung bình, phản ánh mật độ năng lượng phóng điện cao và chu kỳ gia công liên tục. Khi T_{off} tăng, MRR giảm do thời gian gián đoạn phóng điện kéo dài làm suy giảm năng lượng trung bình trên đơn vị thời gian.

Các đường đồng mức nghiêng cho thấy tồn tại tương tác giữa I_p và T_{off} , song I_p vẫn là tham số chi phối chính. Kết quả cho thấy để nâng cao MRR cần ưu tiên tăng I_p và lựa chọn T_{off} ở mức phù hợp, tránh T_{off} quá lớn.

T_{off} kết hợp với SV

Biểu đồ có vùng giá trị cao nhất nằm tại T_{off} thấp (~8–10 μs) và SV độ 5 V. Khi T_{off} tăng quá mức hoặc SV lệch khỏi ngưỡng tối ưu, MRR giảm nhẹ, cho thấy tác động ổn định hóa nhưng không chi phối của 2 thông số này. Tốc độ bóc vật liệu (MRR) chịu ảnh hưởng đồng thời của T_{off} và SV , trong đó T_{off} là tham số chi phối rõ rệt hơn. MRR đạt giá trị cao tại vùng T_{off} thấp–trung bình kết hợp với SV thấp, phản ánh điều kiện phóng điện có mật độ năng lượng cao và hiệu quả bóc tách vật liệu lớn. Khi T_{off} tăng, MRR giảm dần do thời gian ngắt xung kéo dài làm giảm năng lượng trung bình trên đơn vị thời gian. Ảnh hưởng của SV thể hiện ở mức độ điều tiết, trong đó SV thấp giúp duy trì khe hở phóng điện nhỏ và tăng hiệu quả truyền năng lượng. Các đường đồng mức cong cho thấy mối quan hệ phi tuyến và tồn tại tương tác giữa T_{off} và SV . Kết quả cho thấy để tối ưu MRR cần ưu tiên T_{off} nhỏ kết hợp với SV thấp, đồng thời tránh vùng T_{off} lớn làm suy giảm hiệu suất gia công.

T_{on} kết hợp với I_p

MRR đạt cực đại tại vùng $T_{on} \approx 14 \div 16 \mu s$ và $I_p \approx 13 \div 15 A$. Đây là khu vực năng lượng cực đại của quá trình phóng điện, nơi hiệu ứng nhiệt và phun vật liệu đạt đỉnh. Tuy nhiên, mức năng lượng này cần được điều khiển chính xác để tránh sinh ra bề mặt quá thô. Tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng theo cả thời gian phát xung T_{on} và dòng điện xung I_p , trong đó I_p thể hiện vai trò chi phối rõ rệt hơn. MRR đạt giá trị thấp tại vùng T_{on} và I_p nhỏ, sau đó tăng nhanh khi một hoặc cả hai thông số tăng. Các đường đồng mức nghiêng và phân bố dày ở vùng I_p cao phản ánh mối quan hệ phi tuyến và sự tương tác dương giữa T_{on} và I_p , khiến hiệu quả tăng MRR của T_{on} trở nên rõ rệt hơn

khi I_p lớn. I_p tăng làm gia tăng năng lượng phóng điện đỉnh, trong khi T_{on} kéo dài thời gian duy trì plasma, dẫn đến lượng vật liệu bóc tách trên mỗi chu kỳ tăng lên. Do đó, vùng T_{on} cao kết hợp I_p cao là miền cho MRR lớn nhất. Tuy nhiên, khu vực này cần được cân nhắc kết hợp với các yêu cầu về chất lượng bề mặt trong bài toán tối ưu đa mục tiêu.

T_{on} kết hợp với SV

Tăng T_{on} và SV đồng thời giúp MRR tăng tuyến tính. Tuy nhiên, biên độ ảnh hưởng của SV nhỏ hơn nhiều so với T_{on} . Biểu đồ cho thấy T_{on} là yếu tố điều khiển mạnh hiệu suất bóc tách, còn SV hỗ trợ kích hoạt phóng điện. Tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng rõ rệt theo thời gian phát xung T_{on} , trong khi ảnh hưởng của điện áp servo SV là thứ yếu.

Các dải đồng mức gần như song song theo trục SV khẳng định T_{on} là tham số chi phối chính đối với MRR trong cặp khảo sát này. Khi T_{on} tăng, năng lượng phóng điện tích lũy trên mỗi chu kỳ gia công tăng, dẫn đến khả năng bóc vật liệu cao hơn và MRR lớn hơn. Ảnh hưởng của SV chủ yếu thể hiện ở vai trò ổn định khe hở phóng điện, góp phần duy trì quá trình gia công nhưng không làm thay đổi đáng kể xu hướng tăng của MRR theo T_{on} . Các đường đồng mức ít cong cho thấy tương tác T_{on} - SV tồn tại nhưng không mạnh. Do đó, để nâng cao MRR cần ưu tiên tăng T_{on} , trong khi SV chỉ cần lựa chọn ở mức phù hợp nhằm đảm bảo ổn định quá trình.

T_{on} kết hợp với T_{off}

MRR tăng khi T_{on} tăng và T_{off} giảm, đạt cực đại tại $T_{on} = 16 \mu s$ và $T_{off} = 8 \mu s$. Đây là khu vực hoạt động gần biên năng lượng cao của hệ thống, T_{off} ngắn giúp tăng số lần phóng điện trên mỗi đơn vị thời gian, tăng MRR . Tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng rõ rệt theo thời gian phát xung T_{on} , trong khi T_{off} đóng vai trò điều tiết thứ yếu. MRR đạt giá trị lớn tại vùng T_{on} cao kết hợp với T_{off} trung bình–cao, phản ánh sự gia tăng năng lượng phóng điện hiệu dụng trong mỗi chu kỳ gia công. Khi T_{on} thấp, MRR nhỏ bất kể giá trị T_{off} , cho thấy T_{on} là tham số chi phối chính.

Dạng các đường đồng mức nghiêng và cong nhẹ cho thấy mối quan hệ phi tuyến và sự tương tác tồn tại giữa T_{on} và T_{off} , trong đó ảnh hưởng của T_{off} trở nên rõ hơn khi T_{on} tăng. Kết quả cho thấy để nâng cao MRR cần ưu tiên tăng T_{on} và lựa chọn T_{off} phù hợp nhằm duy trì điều kiện phóng điện ổn định.

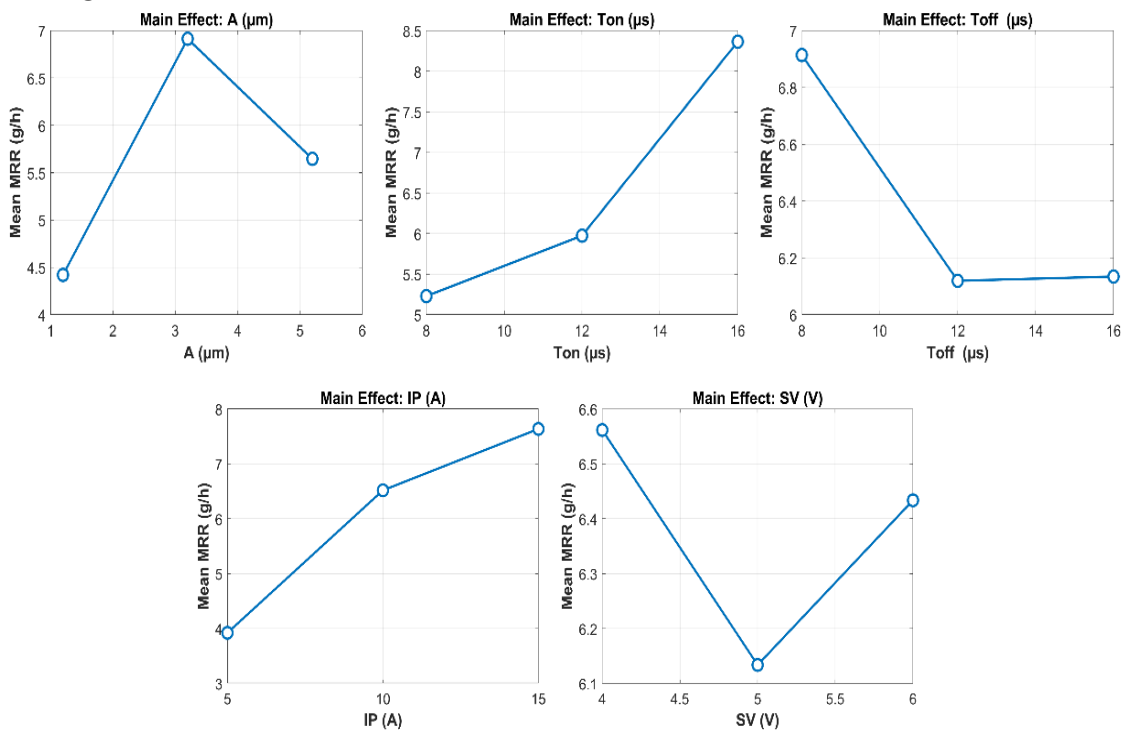
Nhận xét tổng quan

- I_p và T_{on} là hai thông số ảnh hưởng mạnh nhất đến MRR , do liên quan trực tiếp đến năng lượng phóng điện.
- Biên độ rung A có ảnh hưởng phi tuyến, cần điều chỉnh để đạt cộng hưởng tối ưu ($\sim 3,3 \mu m$).

- SV và T_{off} là thông số điều chỉnh ổn định, ít ảnh hưởng trực tiếp đến MRR nhưng đóng vai trò quan trọng trong tối ưu vùng làm việc. Các biểu đồ đều cho thấy tồn tại vùng giá trị tối ưu rõ ràng thay vì xu hướng tăng/giảm đơn điệu - nhấn mạnh bản chất phi tuyến của quá trình $UV-EDM$.

b) Phân tích biểu đồ xu hướng chính của MRR

Biểu đồ xu hướng chính (*Main Effect Plots*) (Hình 3.23) thể hiện ảnh hưởng riêng lẻ của từng thông số đầu vào đến giá trị trung bình của tốc độ bóc tách vật liệu ($MRR - Material Removal Rate$). Các biểu đồ giúp xác định xu hướng biến đổi MRR theo từng thông số, từ đó lựa chọn điều kiện công nghệ tối ưu để nâng cao năng suất gia công.



Hình 3.23 Biểu đồ ảnh hưởng chính (*Main Effect Plots*) của các yếu tố đến MRR

Ảnh hưởng của biên độ rung A

Tốc độ bóc vật liệu trung bình (MRR) phụ thuộc phi tuyến vào thông số A . Khi A tăng từ mức thấp lên mức trung bình, MRR tăng mạnh và đạt giá trị cực đại, phản ánh sự gia tăng hiệu quả truyền năng lượng phóng điện vào vùng gia công. Tuy nhiên, khi A tiếp tục tăng lên mức cao, MRR giảm nhẹ, cho thấy năng lượng không còn được tập trung tối ưu, có thể do hiện tượng phân tán plasma hoặc điều kiện khe hở gia công thay đổi. Xu hướng này khẳng định tồn tại một giá trị A tối ưu để đạt MRR lớn nhất. Do đó, trong tối ưu hóa quá trình, A cần được lựa chọn ở vùng trung bình nhằm nâng cao hiệu suất bóc vật liệu. Biểu đồ cho thấy MRR tăng rõ rệt khi A tăng từ 1 lên 2,6 μm sau đó giảm nhẹ khi A tiếp tục tăng lên 5 μm . Điều này chứng minh sự tồn tại của ngưỡng cộng hưởng tối ưu tại $A \approx 3 \mu\text{m}$, giúp gia tăng hiệu quả phóng điện và đẩy

nhanh quá trình bóc tách vật liệu. Khi A vượt quá mức này, hiệu ứng cơ học có thể gây nhiễu loạn vùng hồ quang, làm giảm hiệu suất.

Ảnh hưởng của thời gian phát xung T_{on}

Tốc độ bóc vật liệu MRR tăng rõ rệt khi thời gian phát xung T_{on} tăng. Ở mức T_{on} thấp, MRR đạt giá trị nhỏ do năng lượng phóng điện trên mỗi xung còn hạn chế. Khi T_{on} tăng lên mức trung bình và cao, MRR gia tăng mạnh, phản ánh sự tích lũy năng lượng phóng điện lớn hơn và khả năng bóc tách vật liệu hiệu quả hơn. Xu hướng này cho thấy T_{on} là tham số chi phối quan trọng đối với MRR . Tuy nhiên, T_{on} quá lớn có thể cần được cân nhắc kết hợp với các tiêu chí chất lượng bề mặt trong bài toán tối ưu đa mục tiêu. MRR tăng mạnh và gần như tuyến tính khi tăng T_{on} từ 8 lên 16 μs . Điều này dễ hiểu vì thời gian phát xung dài giúp gia tăng năng lượng mỗi xung, cho phép xói mòn nhiều vật liệu hơn mỗi lần phóng điện. Đây là một trong những thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến hiệu suất gia công.

Ảnh hưởng của thời gian ngừng xung T_{off} :

MRR giảm khi T_{off} tăng từ 8 lên 12 μs , và gần như không đổi từ 12 lên 16 μs , T_{off} lớn làm giảm số lần phóng điện trên mỗi đơn vị thời gian, từ đó làm giảm MRR . Xu hướng này cho thấy T_{off} có ảnh hưởng đáng kể đến MRR , đặc biệt trong khoảng giá trị thấp–trung bình. Khi T_{off} nhỏ, tần suất phóng điện cao làm tăng năng lượng trung bình truyền vào vùng gia công, qua đó nâng cao MRR . Ngược lại, T_{off} tăng làm kéo dài thời gian ngừng xung, giảm số lần phóng điện trên một đơn vị thời gian, dẫn đến MRR giảm. Việc MRR gần như ổn định khi T_{off} tăng từ 12 đến 16 μs cho thấy ảnh hưởng của T_{off} đạt trạng thái bão hòa trong khoảng này. Do đó, để tối ưu MRR , T_{off} nên được lựa chọn ở mức thấp hoặc vừa phải, tránh các giá trị quá lớn gây suy giảm hiệu quả bóc vật liệu.

Ảnh hưởng của dòng điện xung I_p

MRR tăng mạnh khi I_p tăng từ 5 lên 15 A, từ khoảng 4 g/h lên trên 7,5 g/h. Đây là yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất vì dòng điện xung tỉ lệ trực tiếp với năng lượng phóng điện, tác động mạnh đến khối lượng vật liệu bị bóc tách mỗi đơn vị thời gian. Tốc độ bóc vật liệu (MRR) tăng rõ rệt khi dòng điện xung I_p tăng, phản ánh vai trò chi phối của I_p trong quá trình gia công. MRR tăng mạnh khi I_p tăng từ mức thấp lên trung bình và tiếp tục tăng khi I_p đạt mức cao, cho thấy mối quan hệ thuận và gần tuyến tính trong phạm vi khảo sát. Xu hướng này xuất phát từ việc I_p lớn làm gia tăng năng lượng phóng điện trên mỗi xung, thúc đẩy quá trình nóng chảy và bóc tách vật liệu hiệu quả hơn. So với các thông số khác, I_p thể hiện ảnh hưởng trực tiếp và mạnh mẽ nhất đến MRR . Do đó, việc tăng I_p là giải pháp hiệu quả để nâng cao MRR , tuy nhiên cần cân nhắc đồng thời các yêu cầu về chất lượng bề mặt và ổn định gia công.

Ảnh hưởng của điện áp xung SV

MRR biến thiên theo dạng phi tuyến, với giá trị nhỏ nhất tại mức SV trung bình. Khi SV tăng từ mức thấp lên trung bình, MRR giảm do khe hở phóng điện tăng làm suy giảm mật độ năng lượng tác dụng. Tuy nhiên, khi SV tiếp tục tăng lên mức cao, MRR tăng trở lại nhờ cải thiện tính ổn định của quá trình phóng điện và khả năng thoát mảnh vật liệu. SV ảnh hưởng ít rõ rệt đến MRR so với các yếu tố khác.

Đường cong có dạng chữ V – MRR cao ở $SV = 4$ V và 6 V, thấp nhất tại $SV = 5$ V. Điều này gợi ý có thể tồn tại vùng điện áp không ổn định hoặc hiệu suất thấp quanh mức trung bình. Xu hướng này cho thấy SV có vai trò điều tiết MRR và tồn tại một miền giá trị không thuận lợi tại SV trung bình. Do đó, lựa chọn SV thấp hoặc cao hơn mức trung bình sẽ có lợi hơn cho việc nâng cao MRR .

Nhận xét tổng quan:

- T_{on} và I_p là hai yếu tố ảnh hưởng mạnh mẽ nhất đến MRR , do kiểm soát năng lượng của quá trình phóng điện.
- Biên độ rung A có ảnh hưởng dạng phi tuyến, đạt tối ưu khoảng $3\mu\text{m}$.
- Toff cần điều chỉnh hợp lý: nhỏ để tăng năng suất nhưng không quá ngắn để tránh mất ổn định.
- SV ảnh hưởng yếu, có vai trò phụ trợ trong việc duy trì hồ quang ổn định.

c) Phân tích biểu đồ cột ảnh hưởng chuẩn hóa đến MRR

Biểu đồ Hình 3.24 thể hiện ảnh hưởng chuẩn hóa của từng thông số đầu vào đến chỉ tiêu đầu ra MRR (g/h). Đây là cách thể hiện trực quan để đánh giá mức độ ảnh hưởng tương đối của các yếu tố khi được thay đổi trong phạm vi khảo sát:

Đòng điện xung (I_p) – yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất

I_p có ảnh hưởng mạnh nhất đến MRR , với biên độ ảnh hưởng chuẩn hóa lớn nhất (trên 1,1 g/h). Điều này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết: dòng điện càng lớn thì năng lượng phóng điện càng cao, giúp bóc tách vật liệu nhanh hơn mỗi xung.

Thời gian phát xung (T_{on}) – ảnh hưởng lớn thứ hai

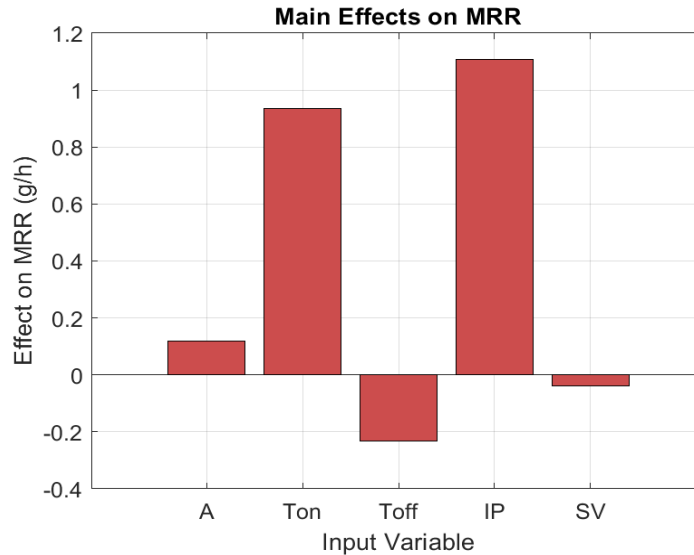
T_{on} cũng cho ảnh hưởng rất lớn (gần 1 g/h), chỉ đứng sau I_p , Thời gian xung dài giúp duy trì tia lửa lâu hơn, từ đó tăng khối lượng vật liệu bị nung chảy trong mỗi lần phóng điện.

Biên độ rung (A) – ảnh hưởng dương nhỏ

A chỉ tạo ra ảnh hưởng dương nhỏ, nghĩa là tăng A trong phạm vi khảo sát có xu hướng tăng nhẹ MRR , tuy nhiên ảnh hưởng này không đáng kể nếu so với I_p và T_{on} . Có thể do hiệu ứng rung chỉ hỗ trợ khuấy trộn môi trường điện môi, không ảnh hưởng trực tiếp đến năng lượng phóng điện.

Thời gian ngừng xung (T_{off}) – ảnh hưởng âm

T_{off} thể hiện ảnh hưởng âm rõ ràng. Khi T_{off} tăng, số lần phóng điện trong một đơn vị thời gian giảm, làm giảm tốc độ bóc tách. Tuy nhiên, ảnh hưởng này thấp hơn đáng kể so với I_p và T_{on} .



Hình 3.24 Biểu đồ cột hiệu ứng chính đến MRR

Điện áp xung (SV) – ảnh hưởng nhỏ và âm nhẹ

SV có ảnh hưởng chuẩn hóa âm rất nhỏ, gần như không đáng kể. SV chủ yếu giúp hình thành và duy trì hồ quang ổn định chứ không trực tiếp tác động đến tốc độ phóng điện, do đó ảnh hưởng đến MRR rất giới hạn.

Nhận xét chung:

- I_p và T_{on} là hai yếu tố chính quyết định tốc độ bóc tách vật liệu, cần được tối ưu song song.
- T_{off} và A có ảnh hưởng phụ, cần điều chỉnh để hỗ trợ ổn định hoặc đạt hiệu quả bổ sung.
- SV có vai trò ổn định quá trình, nhưng ảnh hưởng đến MRR là không đáng kể về mặt định lượng.

3.4.4 Ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến HWR

a) Phân tích biểu đồ đường đồng mức của HWR theo các cặp thông số công nghệ

Các biểu đồ đường đồng mức trên Hình 3.25 thể hiện ảnh hưởng tương hỗ giữa từng cặp thông số đến chỉ tiêu HWR (mm/min), tức là tốc độ mòn điện cực theo phương đứng. Đây là yếu tố quan trọng trong việc duy trì độ chính xác khi gia công bề mặt trụ ngoài bằng điện cực dạng trụ.

Ảnh hưởng kết hợp giữa biên độ rung A và dòng điện xung I_p

Biểu đồ cho thấy tỷ số mòn điện cực (HWR) phụ thuộc đồng thời vào thông số A và dòng điện xung I_p , trong đó I_p là yếu tố chi phối rõ rệt hơn. HWR tăng dần khi I_p

tăng, phản ánh sự gia tăng năng lượng phóng điện gây mòn điện cực mạnh hơn. HWR tăng mạnh khi I_p tăng, còn biên độ A có ảnh hưởng nhỏ và phi tuyến, HWR thấp nhất khi $A \approx 3 \mu\text{m}$ và $I_p \approx 5 \div 6 \text{ A}$. Khi I_p tăng, dòng điện lớn làm tăng năng lượng phóng điện, gây xâm thực mạnh lên điện cực, từ đó tăng tốc độ mòn ngang. Ảnh hưởng của A thể hiện xu hướng phi tuyến nhẹ, với HWR đạt giá trị lớn hơn tại A trung bình và giảm khi A lệch khỏi vùng này.

Các đường đồng mức cong cho thấy tồn tại tương tác giữa A và I_p , tuy nhiên mức độ tương tác không mạnh. Kết quả cho thấy việc kiểm soát I_p là yếu tố then chốt để hạn chế HWR , trong khi A đóng vai trò điều chỉnh thứ yếu.

A kết hợp với điện áp xung SV

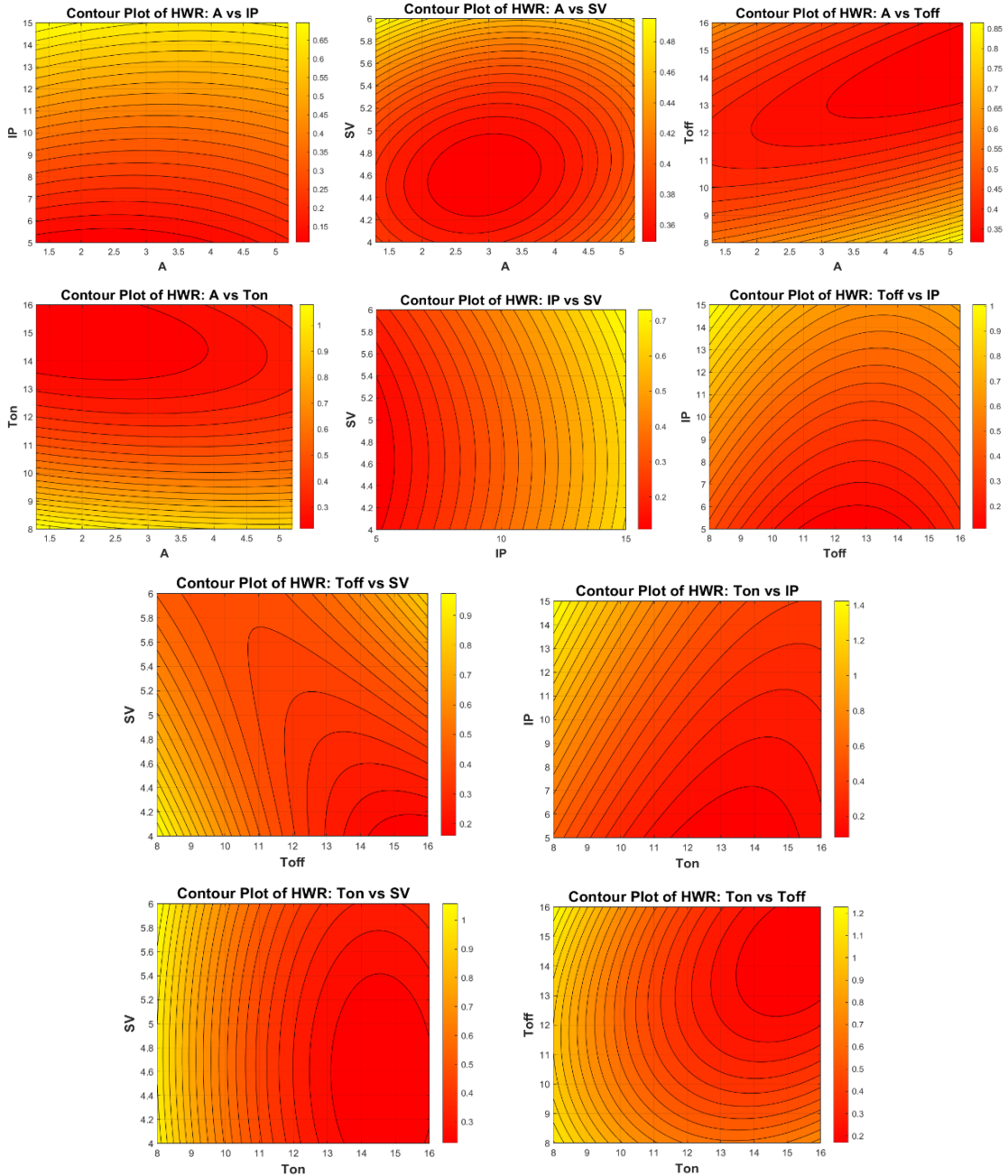
Biểu đồ đường đồng mức cho thấy tỷ lệ mòn điện cực (HWR) phụ thuộc phi tuyến vào cả A và SV , với sự tồn tại của một vùng cực tiểu nội bộ. HWR đạt giá trị thấp nhất tại vùng A trung bình kết hợp với SV trung bình–thấp, thể hiện qua các đường đồng mức elip khép kín quanh tâm đồ thị. Khi A hoặc SV lệch khỏi vùng này, HWR tăng dần, cho thấy hiệu quả mòn điện cực giảm.

Dạng phân bố đồng mức phản ánh tương tác rõ rệt giữa A và SV , trong đó ảnh hưởng của mỗi thông số phụ thuộc vào mức của thông số còn lại. Kết quả cho thấy việc lựa chọn đồng thời A và SV phù hợp là cần thiết để giảm mòn điện cực trong quá trình gia công. HWR có xu hướng thấp nhất khi $A \approx 3 \text{ mm}$ và $SV \approx 4,5 \div 4,8 \text{ V}$. Biểu đồ cho thấy vùng tối ưu nằm ở trung tâm, với các giá trị lớn hơn hoặc nhỏ hơn đều làm HWR tăng. Điều này cho thấy tồn tại điểm cộng hưởng tối ưu, nơi mà cả rung động và điện áp cùng duy trì sự ổn định phóng điện mà không gây mòn mạnh.

A kết hợp với thời gian dừng xung T_{off}

Biểu đồ cho thấy tỷ số mòn điện cực (HWR) phụ thuộc đồng thời vào A và T_{off} , với xu hướng giảm dần khi T_{off} tăng. Ở vùng T_{off} thấp, HWR đạt giá trị cao hơn, đặc biệt khi A lớn, phản ánh sự gia tăng cường độ phóng điện và mài mòn điện cực. Khi T_{off} tăng, HWR giảm rõ rệt do thời gian ngắt xung dài hơn giúp cải thiện khả năng phục hồi điện môi và giảm tác động nhiệt lên điện cực.

Ảnh hưởng của A thể hiện rõ hơn tại T_{off} thấp, trong khi tại T_{off} cao, tác động của A bị suy giảm. Kết quả cho thấy T_{off} đóng vai trò điều tiết quan trọng trong việc kiểm soát HWR , còn A chủ yếu ảnh hưởng ở điều kiện phóng điện liên tục. HWR có xu hướng đạt cực tiểu trong vùng $A = 3 \mu\text{m}$ và $T_{off} = 12 \div 13 \mu\text{s}$. Khi T_{off} quá nhỏ, vật liệu chưa kịp nguội và mảnh vụn chưa được cuốn đi, làm tăng mòn điện cực. Khi T_{off} quá lớn, thời gian ngừng tăng lên, năng lượng phóng điện có thể trở nên không ổn định, gây mòn biên theo hướng ngang.



Hình 3.25 Biểu đồ đường đồng mức kết hợp của HWR

***A* kết hợp với thời gian phát xung T_{on}**

Biểu đồ đường đồng mức cho thấy tỷ lệ mòn điện cực (HWR) tăng chủ yếu theo thời gian phát xung T_{on} , trong khi ảnh hưởng của thông số A thể hiện ở mức thứ yếu. HWR đạt giá trị cao tại vùng T_{on} trung bình–cao, phản ánh sự gia tăng năng lượng phóng điện và thời gian duy trì plasma, làm tăng mức độ mòn điện cực. Biểu đồ cho thấy T_{on} càng lớn thì HWR càng cao, do thời gian tác động nhiệt dài hơn lên bề mặt điện cực. Tuy nhiên, khi A nằm gần vùng tối ưu ($\approx 3 \mu\text{m}$), ảnh hưởng này được giảm nhẹ, nhờ hiệu ứng siêu âm làm mát và giảm tiếp xúc trực tiếp. Ảnh hưởng của A có dạng phi tuyến nhẹ, với xu hướng HWR lớn hơn tại A trung bình so với các giá trị thấp hoặc cao. Các đường đồng mức cong cho thấy tồn tại tương tác giữa A và T_{on} ,

trong đó tác động của A trở nên rõ hơn khi T_{on} tăng. Kết quả cho thấy việc kiểm soát T_{on} là yếu tố then chốt để hạn chế HWR , trong khi A đóng vai trò điều chỉnh phụ trợ.

I_p kết hợp với SV

Biểu đồ đường đồng mức cho thấy tỷ lệ mòn điện cực (HWR) tăng chủ yếu theo dòng điện xung I_p , trong khi ảnh hưởng của SV mang tính điều tiết và ít chi phối hơn. Khi I_p tăng, HWR tăng gần như đơn điệu, phản ánh sự gia tăng năng lượng phóng điện tác động lên điện cực. Cả hai thông số I_p và SV đều có xu hướng làm tăng HWR khi tăng, I_p ảnh hưởng chính - tăng dòng điện dẫn đến phóng điện mạnh hơn và mòn ngang lớn hơn, SV ảnh hưởng phụ, ổn định điện áp ở mức phù hợp ($\approx 4,5 \div 5$ V) có thể giúp giảm mòn nhẹ. Ảnh hưởng của SV thể hiện ở mức độ thứ yếu, với xu hướng HWR tăng nhẹ khi SV tăng do điều kiện phóng điện ổn định hơn. Các đường đồng mức gần song song theo trục SV cho thấy tương tác I_p - SV tồn tại nhưng không mạnh. Kết quả khẳng định I_p là thông số quyết định đối với HWR , còn SV chỉ đóng vai trò hỗ trợ điều chỉnh.

T_{off} kết hợp với I_p

Biểu đồ đường đồng mức cho thấy tỷ lệ mòn điện cực (HWR) chịu ảnh hưởng đồng thời của T_{off} và I_p , trong đó I_p thể hiện vai trò chi phối rõ rệt hơn. HWR có xu hướng tăng khi I_p tăng, phản ánh sự gia tăng năng lượng phóng điện và mức độ ăn mòn điện cực. Ảnh hưởng của T_{off} mang tính phi tuyến, với HWR đạt giá trị thấp hơn tại khoảng T_{off} trung bình và tăng khi T_{off} quá nhỏ hoặc quá lớn. Biểu đồ cho thấy I_p chi phối mạnh xu hướng tăng HWR , còn T_{off} ảnh hưởng dạng parabol, có điểm cực tiểu tại $\approx 12,5$ μs . Khi T_{off} quá nhỏ hoặc quá lớn, HWR đều tăng, cho thấy cần chọn T_{off} tối ưu để giảm mòn.

Các đường đồng mức cong cho thấy tồn tại tương tác giữa T_{off} và I_p , trong đó tác động của T_{off} trở nên rõ rệt hơn ở I_p cao. Kết quả cho thấy để giảm HWR cần ưu tiên kiểm soát I_p và lựa chọn T_{off} phù hợp nhằm hạn chế mòn điện cực trong quá trình gia công.

T_{off} kết hợp với SV

Biểu đồ đường đồng mức cho thấy tỷ lệ mòn điện cực (HWR) phụ thuộc đồng thời vào T_{off} và SV , với xu hướng giảm khi T_{off} tăng và SV giảm. HWR thấp nhất tại vùng $T_{off} = 12 \div 14$ μs và $SV \approx 4,5 \div 4,8$ V. Biểu đồ dạng lõm thể hiện rõ vùng tối ưu giúp hạn chế mòn ngang điện cực.

Các đường đồng mức cong và nghiêng phản ánh mối quan hệ phi tuyến và sự tương tác rõ rệt giữa hai thông số, trong đó ảnh hưởng của T_{off} trở nên nổi bật hơn ở vùng SV thấp. HWR đạt giá trị lớn tại vùng T_{off} nhỏ kết hợp SV cao, do mật độ năng lượng phóng điện tập trung mạnh lên điện cực. Ngược lại, T_{off} lớn và SV thấp giúp

phân tán năng lượng phóng điện và cải thiện điều kiện phục hồi điện môi, qua đó làm giảm HWR . Kết quả cho thấy việc lựa chọn T_{off} tương đối lớn kết hợp SV phù hợp là cần thiết để hạn chế mòn điện cực trong quá trình gia công.

T_{on} kết hợp với I_p

Biểu đồ đường đồng mức cho thấy tỷ lệ mòn điện cực HWR tăng theo cả thời gian phát xung (T_{on}) và dòng điện xung (I_p), trong đó T_{on} thể hiện vai trò chi phối rõ rệt hơn. HWR đạt giá trị lớn tại vùng T_{on} cao, đặc biệt khi kết hợp với I_p trung bình–cao, phản ánh sự gia tăng năng lượng phóng điện tác động lên điện cực. T_{on} và I_p đều có xu hướng làm HWR tăng khi tăng, I_p lớn làm mòn nhiều hơn. T_{on} dài kéo dài thời gian phóng điện mỗi xung, gây ra nhiệt tích tụ và xói mòn nặng tại mép điện cực.

Các đường đồng mức cong cho thấy mối quan hệ phi tuyến và sự tồn tại của tương tác dương giữa T_{on} và I_p , khiến ảnh hưởng của I_p trở nên rõ rệt hơn khi T_{on} tăng. T_{on} lớn kéo dài thời gian duy trì plasma, làm tăng mức độ ăn mòn điện cực, trong khi I_p cao làm gia tăng mật độ năng lượng tại vùng phóng điện. Do đó, để giảm HWR cần ưu tiên giảm T_{on} và kiểm soát I_p ở mức hợp lý.

T_{on} kết hợp với SV

HWR thấp nhất tại vùng $SV \approx 4,5 \div 4,8$ V và T_{on} trong khoảng $12 \div 13$ μs . Khi cả hai thông số vượt quá mức tối ưu, HWR tăng nhẹ – nhất là khi T_{on} cao.

Biểu đồ cho thấy HWR giảm rõ rệt khi thời gian phát xung T_{on} tăng, trong khi ảnh hưởng của điện áp servo SV mang tính điều tiết thứ yếu. Ở vùng T_{on} thấp, HWR đạt giá trị cao do năng lượng phóng điện tập trung gây mòn điện cực mạnh; khi T_{on} tăng, năng lượng được phân bố ổn định hơn làm HWR giảm. HWR thấp nhất tại vùng $SV \approx 4,5 \div 4,8$ V và T_{on} trong khoảng $12 \div 13$ μs . Khi cả hai thông số vượt quá mức tối ưu, HWR tăng nhẹ – nhất là khi T_{on} cao.

Các đường đồng mức dạng elip nghiêng phản ánh mối quan hệ phi tuyến và sự tồn tại tương tác giữa T_{on} và SV , trong đó tác động của SV trở nên rõ hơn tại T_{on} thấp. Tuy nhiên, T_{on} vẫn là tham số chi phối chính quyết định xu hướng biến thiên của HWR . Do đó, để giảm HWR cần ưu tiên lựa chọn T_{on} lớn, kết hợp SV ở mức phù hợp nhằm duy trì sự ổn định của khe hở phóng điện.

T_{on} kết hợp với T_{off}

Biểu đồ cho thấy tỷ số mòn điện cực (HWR) phụ thuộc đồng thời vào thời gian phát xung T_{on} và thời gian ngừng xung T_{off} , với T_{on} thể hiện vai trò chi phối rõ rệt hơn. HWR có xu hướng tăng khi T_{on} tăng, đặc biệt ở vùng T_{on} lớn kết hợp với T_{off} trung bình–cao, phản ánh sự gia tăng năng lượng phóng điện tác động lên điện cực. Ảnh hưởng của T_{off} mang tính phi tuyến, trong đó T_{off} trung bình góp phần làm HWR tăng, còn T_{off} quá thấp hoặc quá cao làm giảm HWR do điều kiện phóng điện kém ổn định

hoặc năng lượng trung bình bị phân tán. Cặp thông số này cho thấy HWR tăng mạnh nếu cả T_{on} và T_{off} đều thấp hoặc đều cao. Vùng tối ưu nằm quanh $T_{on} = 13 \div 14 \mu s$, $T_{off} = 12 \div 13 \mu s$, cho thấy cần sự cân bằng giữa thời gian gia công và thời gian nghỉ để hạn chế mòn không mong muốn trên điện cực. Dạng cong của các đường đồng mức cho thấy tồn tại tương tác giữa T_{on} và T_{off} khiến tác động của T_{off} trở nên rõ rệt hơn khi T_{on} lớn. Kết quả cho thấy để hạn chế HWR cần ưu tiên giảm T_{on} và lựa chọn T_{off} lệch khỏi miền gây mòn điện cực cao.

Nhận xét tổng quan:

- Dòng điện xung I_p và thời gian phát xung T_{on} là hai yếu tố gây mòn ngang mạnh nhất, cần được kiểm soát để đảm bảo tuổi thọ điện cực.
- Biên độ rung A có ảnh hưởng điều tiết, nếu chọn đúng vùng cộng hưởng ($\approx 3 \mu m$), có thể giảm HWR đáng kể.
- SV và T_{off} giúp ổn định quá trình, với vùng tối ưu rõ rệt nằm quanh $SV \approx 4,5-5 V$ và $T_{off} \approx 12-13 \mu s$.
- Các biểu đồ cho thấy mối quan hệ phi tuyến rõ rệt, đòi hỏi tối ưu đa mục tiêu nếu muốn đồng thời giảm HWR và tăng MRR hoặc giảm Ra .

b) Phân tích biểu đồ xu hướng chính của tốc độ mòn điện cực theo phương đứng HWR

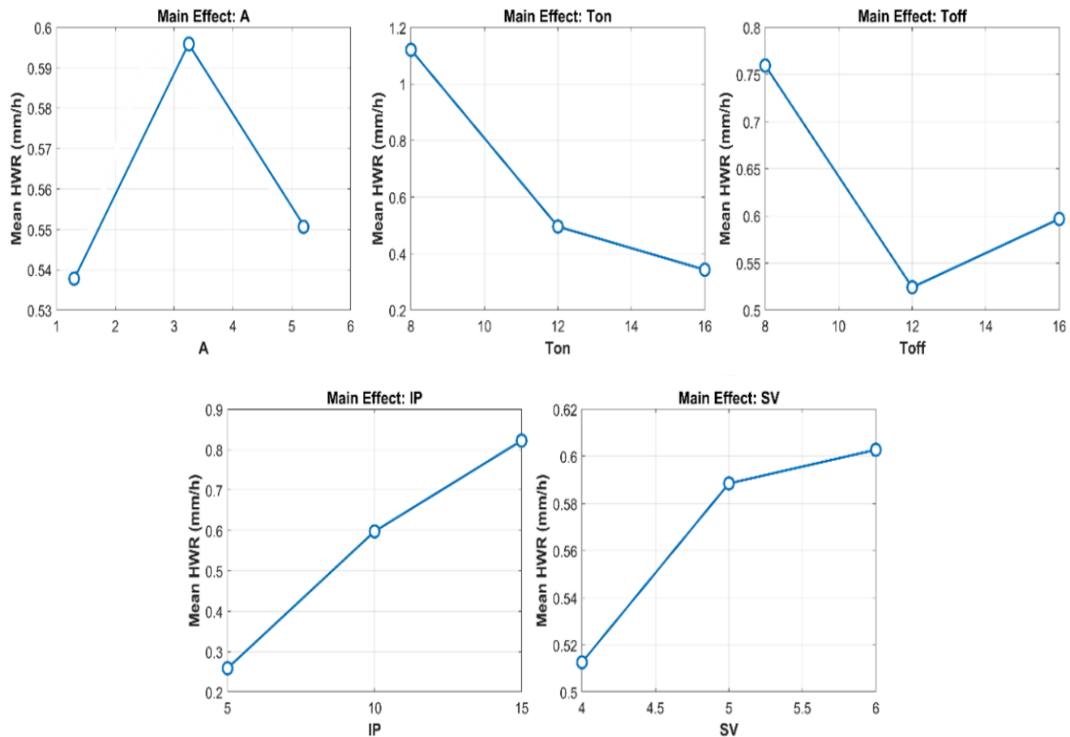
Biểu đồ xu hướng chính (*Main Effect Plots*) (Hình 3.16) phản ánh ảnh hưởng riêng lẻ của từng thông số công nghệ đến giá trị trung bình của tốc độ mòn theo phương đứng của điện cực (HWR – *Horizontal Wear Rate*, đơn vị: mm/h). Đây là một chỉ số quan trọng phản ánh độ bền hình học và độ chính xác của điện cực trong quá trình gia công bề mặt trụ ngoài.

Ảnh hưởng của biên độ rung A :

Biểu đồ ảnh hưởng chính cho thấy HWR biến thiên theo thông số A theo dạng phi tuyến bậc hai. Khi A tăng từ mức thấp lên mức trung bình, HWR tăng và đạt giá trị cực đại tại A trung bình, phản ánh sự gia tăng mức độ tiêu hao điện cực do năng lượng phóng điện tập trung hơn. HWR tăng khi A tăng từ $1 \mu m$ lên $3,2 \mu m$; Sau đó giảm khi A tiếp tục tăng đến $5 \mu m$. Xu hướng này cho thấy $A = 3,2 \mu m$ là ngưỡng cộng hưởng, nơi mà biên độ rung tác động mạnh đến điện cực. Khi vượt quá ngưỡng này, biên độ rung lớn hơn giúp giảm tiếp xúc trực tiếp và phân tán nhiệt tốt hơn, do đó giảm tốc độ mòn ngang. Khi A tiếp tục tăng lên mức cao, HWR giảm nhẹ, cho thấy một phần năng lượng phóng điện được phân tán, làm giảm mức độ mòn tương đối của điện cực. Xu hướng này khẳng định A có ảnh hưởng đáng kể nhưng không đơn điệu đến HWR , và việc lựa chọn A trung bình cần được cân nhắc nếu mục tiêu giảm mòn điện cực.

Ảnh hưởng của thời gian phát xung T_{on} :

Biểu đồ ảnh hưởng chính cho thấy HWR giảm rõ rệt khi thời gian phát xung T_{on} tăng, phản ánh mối quan hệ nghịch chiều giữa hai đại lượng. Ở T_{on} thấp, HWR đạt giá trị lớn do năng lượng xung tập trung cao, dẫn đến mài mòn điện cực mạnh. Khi T_{on} tăng, năng lượng phóng điện được phân bố trong thời gian dài hơn, làm giảm tốc độ mài mòn tương đối của điện cực và kéo theo sự suy giảm HWR . Xu hướng giảm dần của HWR theo T_{on} cho thấy T_{on} là tham số có ảnh hưởng chi phối và mang tính đơn điệu trong phạm vi khảo sát. HWR giảm mạnh khi T_{on} tăng từ 8 lên 12 μs , và tiếp tục giảm nhẹ đến 16 μs . Điều này phản trực giác nhưng có thể giải thích bằng việc T_{on} lớn giúp tạo xung dài ổn định, trong khi xung ngắn và mạnh (T_{on} nhỏ) gây sốc nhiệt và va đập, làm tăng mòn ngang. Ngoài ra, các xung dài giúp plasma ổn định hơn, từ đó giảm tập trung mòn tại rìa điện cực. Kết quả này gợi ý rằng việc lựa chọn T_{on} lớn là giải pháp hiệu quả để hạn chế mài mòn điện cực trong quá trình gia công.



Hình 3.26 Biểu đồ hiệu ứng chính (Main Effect Plots) của các yếu tố đến HWR

Ảnh hưởng của thời gian dừng xung T_{off} :

Biểu đồ ảnh hưởng chính cho thấy HWR biến thiên phi tuyến theo T_{off} , với giá trị lớn nhất tại T_{off} thấp và giảm mạnh khi T_{off} tăng đến mức trung bình, sau đó tăng nhẹ trở lại ở T_{off} cao. HWR có dạng đường cong chữ U: cao ở $T_{off} = 8 \mu s$ và $16 \mu s$, thấp nhất ở $T_{off} = 12 \mu s$. Điều này cho thấy T_{off} tối ưu nằm khoảng 12 μs , đảm bảo đủ thời gian để điện cực nguội và chất điện môi loại bỏ mảnh vụn, giảm xâm thực mép ngang. Xu hướng này phản ánh vai trò điều tiết của T_{off} đối với trạng thái phóng điện và cơ chế mòn điện cực. Khi T_{off} quá nhỏ, quá trình khử ion chưa hoàn toàn làm gia

tăng mòn điện cực; trong khi T_{off} trung bình giúp ổn định khe hở phóng điện, làm HWR giảm xuống mức tối thiểu. Ở T_{off} lớn, chu kỳ gia công bị gián đoạn, hiệu quả bóc tách vật liệu giảm, dẫn đến HWR tăng trở lại. Kết quả cho thấy tồn tại một giá trị T_{off} tối ưu nhằm hạn chế mòn điện cực và cải thiện hiệu quả gia công.

Ảnh hưởng của dòng điện xung I_p :

Biểu đồ cho thấy HWR tăng gần như tuyến tính khi dòng điện xung I_p tăng trong toàn bộ miền khảo sát. Khi I_p tăng từ mức thấp lên mức cao, giá trị HWR gia tăng rõ rệt, phản ánh sự gia tăng mạnh của năng lượng phóng điện tác động lên điện cực. HWR tăng mạnh tuyến tính khi I_p tăng từ 5 lên 15 A. I_p lớn đồng nghĩa với tăng năng lượng mỗi xung, dẫn đến tăng tốc độ mòn toàn bộ điện cực, đặc biệt là tại vùng rìa nơi mật độ điện trường thường cao hơn. Đây là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến HWR trong biểu đồ này. I_p lớn làm tăng cường độ phóng điện và nhiệt lượng tập trung, dẫn đến hiện tượng nóng chảy và mòn điện cực mạnh hơn. Xu hướng này khẳng định I_p là thông số chi phối chính đối với HWR . Do đó, việc lựa chọn I_p cần được cân nhắc cẩn trọng nhằm hạn chế mòn điện cực HWR trong bài toán tối ưu đa mục tiêu.

Ảnh hưởng của điện áp xung SV :

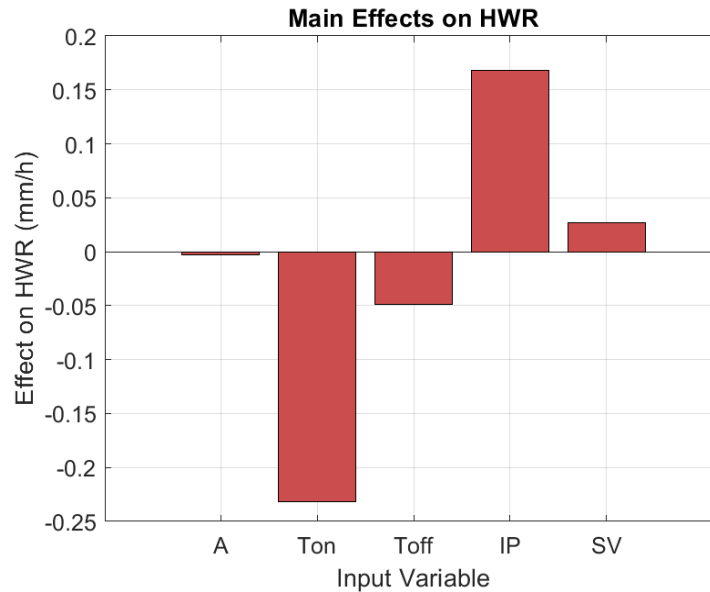
Biểu đồ ảnh hưởng chính cho thấy HWR tăng theo SV trong toàn bộ phạm vi khảo sát, phản ánh mối quan hệ đơn điệu và tương đối tuyến tính. Khi SV tăng, khe hở phóng điện được mở rộng và quá trình phóng điện trở nên ổn định hơn, làm gia tăng mức độ tiêu hao điện cực. HWR tăng dần theo SV nhưng với tốc độ chậm. Mặc dù SV không trực tiếp quyết định năng lượng phóng điện như I_p , nhưng nếu tăng quá mức có thể gây mất ổn định hồ quang, từ đó tăng mòn điện cực. Tuy nhiên, ảnh hưởng của SV vẫn nhỏ hơn I_p và T_{on} . Tuy nhiên, độ dốc đường cong không lớn, cho thấy mức độ nhạy của HWR đối với SV ở mức trung bình so với các thông số năng lượng khác. Kết quả này khẳng định SV có ảnh hưởng dương đến HWR nhưng chủ yếu đóng vai trò điều tiết, không phải tham số chi phối chính. Do đó, việc lựa chọn SV cần được cân nhắc phối hợp với các thông số khác nhằm kiểm soát HWR hiệu quả.

Nhận xét tổng hợp:

- I_p là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến mòn ngang, cần đặc biệt kiểm soát nếu yêu cầu độ chính xác cao.
- T_{on} và T_{off} là các yếu tố điều chỉnh quan trọng, giúp giảm mòn nếu được thiết lập hợp lý.
- A và SV ảnh hưởng nhẹ hơn, tuy nhiên vẫn có điểm cực trị cần chú ý để tối ưu.
- Vùng thiết lập tối ưu để giảm HWR thường rơi vào $A \approx 3 \mu\text{m}$, $T_{on} \geq 12 \mu\text{s}$, $T_{off} \approx 12 \mu\text{s}$, $SV \approx 4,8 \div 5 \text{ V}$, $I_p \leq 10 \text{ A}$.

c) Phân tích biểu đồ cột ảnh hưởng chuẩn hóa đến *HWR*

Biểu đồ Hình 3.27 thể hiện mức ảnh hưởng chuẩn hóa của từng thông số đầu vào đến chỉ tiêu *HWR* (mm/h). Các giá trị trong biểu đồ là mức chênh lệch trung bình của *HWR* khi thay đổi mỗi biến trong phạm vi khảo sát, giúp so sánh mức độ ảnh hưởng tương đối giữa các yếu tố.



Hình 3.27 Biểu đồ cột hiệu ứng chính đến *HWR*

Dòng điện xung (I_p) – ảnh hưởng dương lớn nhất:

I_p là thông số gây tăng *HWR* mạnh nhất, với mức ảnh hưởng chuẩn hóa dương khoảng +0,17 mm/h. Dòng điện cao làm tăng năng lượng xung điện, từ đó gây xâm thực mạnh và ăn mòn rõ rệt ở rìa ngang của điện cực. Đây là yếu tố chi phối mòn nhiều nhất trong hệ thống.

Thời gian phát xung (T_{on}) – ảnh hưởng âm mạnh:

Ngược lại với I_p , T_{on} có ảnh hưởng âm lớn nhất ($\approx -0,23$ mm/h), nghĩa là tăng T_{on} sẽ làm giảm tốc độ mòn ngang. Điều này phản ánh vai trò của xung dài trong việc duy trì hồ quang ổn định, giảm xung đột nhiệt lặp lại, và từ đó hạn chế sự xâm thực không đồng đều lên mặt bên của điện cực.

Thời gian dừng xung (T_{off}) – ảnh hưởng âm nhẹ:

T_{off} có ảnh hưởng âm nhỏ hơn T_{on} , nhưng vẫn giúp giảm *HWR* khi được tăng lên. Điều này là do T_{off} lớn giúp tăng thời gian nghỉ, hỗ trợ làm mát điện cực và loại bỏ mảnh vụn, giảm hiện tượng mòn ngang.

Điện áp xung (SV) - ảnh hưởng dương nhẹ:

SV có ảnh hưởng dương nhưng rất nhỏ. Khi SV tăng, nếu không kiểm soát tốt có thể gây dao động điện trường ở mép điện cực, khiến *HWR* tăng nhẹ.

Tuy nhiên, ảnh hưởng này không đáng kể so với I_p và T_{on} .

Biên độ rung (A) – ảnh hưởng gần như bằng 0:

A có ảnh hưởng rất nhỏ và gần như không đáng kể trong biểu đồ chuẩn hóa. Điều này cho thấy ảnh hưởng phi tuyến của biên độ rung không thể hiện rõ khi chỉ phân tích tuyến tính.

Tuy nhiên, trong các biểu đồ đường đồng mức trước đó. A vẫn có vai trò quan trọng trong việc tạo vùng tối ưu giảm HWR .

Nhận xét tổng hợp:

- I_p và T_{on} là hai thông số có ảnh hưởng đối lập nhưng mạnh mẽ nhất đến HWR : I_p làm tăng mòn, còn T_{on} làm giảm mòn.
- T_{off} và SV ảnh hưởng nhẹ, điều chỉnh để hỗ trợ ổn định quá trình và giảm mòn phụ.
- Biên độ rung A ảnh hưởng rất nhỏ về mặt tuyến tính, nhưng có thể đóng vai trò quan trọng trong tương tác phi tuyến.
- Cần kết hợp I_p thấp + T_{on} cao + T_{off} vừa phải + SV ổn định để giảm thiểu tốc độ mòn ngang điện cực trong $UV-EDM$.

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

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

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*

Dựa trên mô hình hồi quy bậc hai được xây dựng trong mục 3.2 biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số công nghệ đầu vào và tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*) (công thức 3.3), việc tối ưu hóa đơn mục tiêu đã được thực hiện nhằm tìm ra tổ hợp thông số mang lại giá trị *MRR* lớn nhất trong phạm vi khảo sát thực nghiệm.

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: $A = 1,53 \mu\text{m}$; $T_{on} = 16,00 \mu\text{s}$;

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

Kết quả cho thấy tốc độ bóc tách vật liệu lớn nhất đạt được khi sử dụng tổ hợp thông số gồm: biên độ rung cao trung bình (xấp xỉ 3,5 μm), thời gian phát xung lớn nhất (16 μs), dòng điện cao (15 A), kết hợp với thời gian ngắt và điện áp servo ở mức tối thiểu. Cấu hình này giúp: Tăng năng lượng mỗi xung (nhờ T_{on} và I_p lớn), tăng mật độ xung (T_{off} ngắn), duy trì hiệu quả phóng điện (SV thấp), và tăng hiệu quả dòng điện môi nhờ hỗ trợ rung siêu âm ở biên độ tối ưu.

Tổ hợp tối ưu này sẽ được sử dụng để so sánh với kết quả thực nghiệm xác nhận ở các mục tiếp theo, nhằm đánh giá độ tin cậy của mô hình và hiệu quả thực tiễn của chiến lược tối ưu hóa.

3.5.2 Kiểm chứng thực nghiệm

Để đánh giá độ tin cậy của mô hình nêu trên, một thí nghiệm đã được tiến hành với các thông số đầu vào tối ưu nêu trên đã được quy chuẩn theo các giá trị thực của máy *EDM*:

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

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

Trong chương này, luận án đã thực hiện mô hình hóa và tối ưu hóa đơn mục tiêu cho quá trình gia công xung điện có trợ giúp rung động siêu âm (*UV-EDM*) trên bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi sử dụng điện cực graphite. Ba chỉ tiêu đầu ra chính gồm

độ nhám bề mặt (Ra), tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) và tốc độ mòn điện cực theo phương đứng (HWR) đã được phân tích thông qua các mô hình hồi quy bậc hai và mô hình GPR .

Kết quả phân tích phương sai cho thấy dòng điện xung (I_p) và thời gian phóng điện (T_{on}) là các thông số chi phối chủ yếu đối với cả ba chỉ tiêu đầu ra, phù hợp với bản chất nhiệt–điện của quá trình EDM . Các thông số còn lại như biên độ rung siêu âm (A), thời gian ngắt xung (T_{off}) và điện áp xung (SV) đóng vai trò điều tiết, góp phần ổn định quá trình phóng điện và cải thiện hiệu quả gia công trong những khoảng giá trị nhất định.

Khi tối ưu hóa độ nhám bề mặt Ra , chế độ tối ưu có xu hướng sử dụng dòng điện và thời gian phóng điện ở mức thấp đến trung bình, kết hợp với biên độ rung siêu âm phù hợp, nhằm hạn chế năng lượng xung và giảm tác động nhiệt lên bề mặt gia công. Điều này cho thấy rung động siêu âm góp phần cải thiện chất lượng bề mặt thông qua tăng cường khả năng rửa trôi mảnh vụn và phân tán năng lượng phóng điện. Tuy nhiên, chế độ tối ưu Ra thường đi kèm với giảm MRR , thể hiện mối quan hệ đánh đổi giữa chất lượng bề mặt và năng suất gia công.

Đối với tốc độ bóc tách vật liệu MRR , bộ thông số tối ưu đạt được với dòng điện và thời gian phóng điện lớn, cùng thời gian ngắt xung ngắn, nhằm tăng mật độ năng lượng phóng điện. Trong trường hợp này, rung động siêu âm hỗ trợ duy trì tính ổn định của hồ quang và cải thiện khả năng thoát mảnh vụn, cho phép đạt MRR cao hơn, nhưng đồng thời làm tăng độ nhám bề mặt và mòn điện cực.

Kết quả tối ưu hóa tốc độ mòn điện cực HWR cho thấy mòn điện cực giảm khi dòng điện xung thấp, thời gian phóng điện được lựa chọn phù hợp và thời gian ngắt xung tăng, nhằm hạn chế tác động nhiệt kéo dài lên điện cực. Biên độ rung siêu âm ở mức trung bình góp phần ổn định phóng điện và giảm mòn cục bộ, mặc dù ảnh hưởng của thông số này mang tính phi tuyến và phụ thuộc vào sự kết hợp với các thông số điện.

Phân tích tổng hợp các chế độ tối ưu đơn mục tiêu cho thấy không tồn tại một bộ thông số duy nhất có thể đồng thời tối ưu Ra , MRR và HWR . Mỗi chế độ tối ưu phản ánh một định hướng công nghệ riêng và đi kèm với những đánh đổi nhất định. Do đó, các kết quả tối ưu đơn mục tiêu trong Chương 3 đóng vai trò nền tảng quan trọng cho việc xây dựng và giải quyết bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu được trình bày trong Chương 4.

Chương 4. TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU

4.1 Giới thiệu

Gia công xung điện (*EDM*) được sử dụng rộng rãi để tạo hình các chi tiết bằng vật liệu cứng, khó gia công bằng phương pháp truyền thống. *EDM* có khả năng gia công các bề mặt phức tạp, các bề mặt hốc lõm, khe hẹp... mà không gây biến dạng cơ học lớn do không có tiếp xúc trực tiếp giữa điện cực và phôi. Tuy nhiên, hạn chế cố hữu của *EDM* là năng suất bóc tách vật liệu (*MRR*) thường thấp và chất lượng bề mặt sau gia công chưa cao (độ nhám *Ra* lớn) do ảnh hưởng của quá trình phóng tia lửa điện. Thông thường, việc tăng *MRR* bằng cách tăng năng lượng tia lửa (dòng điện, thời gian xung, v.v.) sẽ làm giảm chất lượng bề mặt, trong khi nếu muốn đạt bề mặt nhẵn thì phải giảm năng lượng phóng tia, dẫn đến giảm *MRR*. Do đó, bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu để vừa tăng năng suất bóc tách vật liệu vừa giảm độ nhám bề mặt đã và đang là hướng nghiên cứu cần thiết trong lĩnh vực *EDM* hiện nay [60, 87]. Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc lựa chọn bộ thông số công nghệ tối ưu nhằm đạt được sự đánh đổi hợp lý giữa năng suất và chất lượng bề mặt trong gia công *EDM*.

Cùng với các nghiên cứu thực nghiệm, mô phỏng số và các phương pháp tối ưu hóa thông minh đã được áp dụng để hiểu rõ hơn và tối ưu hóa quá trình *EDM*. Phân tích bằng phần tử hữu hạn (*FEM*) cho phép khảo sát chi tiết cơ chế bóc vật liệu và ảnh hưởng của rung động siêu âm. Singh và cộng sự (2011) đã xây dựng mô hình *FEM* mô phỏng tác động của rung động siêu âm lên phôi trong *EDM*, qua đó lý giải sự phân bố ứng suất nhiệt và biến dạng vi mô ảnh hưởng đến quá trình phá hủy vật liệu [88]. Choubey và cộng sự (2020) thì tập trung mô phỏng tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*) trong *micro-EDM* có và không có rung siêu âm, cho thấy kết quả mô phỏng phù hợp với xu hướng thực nghiệm: *MRR* tăng rõ rệt khi có rung động siêu âm, đặc biệt ở vùng thông số mà quá trình *EDM* thường bị ngắt quãng do mảnh vụn [89].

Về mặt tối ưu hóa tham số, nhiều phương pháp đã được triển khai. Shabgard và cộng sự (2013) áp dụng logic mờ (*fuzzy*) để lựa chọn bộ thông số tối ưu cho *EDM* thường và *EDM* có siêu âm, cho phép xét đồng thời nhiều tiêu chí như *MRR*, độ mòn điện cực, độ nhám bề mặt...; kết quả cho thấy cách tiếp cận mờ giúp tìm được bộ thông số hài hòa, cải thiện đồng thời các chỉ tiêu chất lượng [90]. Các phương pháp thiết kế thực nghiệm cổ điển như *Taguchi* cũng được sử dụng để tìm điểm tối ưu cho quá trình *micro-EDM* có siêu âm: Prihandana và cộng sự (2009) đã dùng phương pháp *Taguchi* phân tích ảnh hưởng của việc treo vi bột trong điện môi và rung siêu âm tới *micro-EDM*, từ đó tối ưu hóa được thông số để tăng *MRR* và giảm độ mòn điện cực một cách hiệu quả [71].

Gần đây hơn, các kỹ thuật tối ưu hóa hiện đại và thuật toán thông minh được đưa vào nghiên cứu *EDM*. Xu và cộng sự (2024) đã thực hiện tối ưu hóa đa mục tiêu (sử dụng mô hình hồi quy bậc hai và phương pháp hàm mong muốn) cho quá trình *micro-EDM* với hỗ trợ siêu âm khi gia công hợp kim Ti-6Al-4V, nhằm tối đa hóa *MRR* đồng thời tối thiểu hóa mòn điện cực; kết quả không chỉ tìm được bộ thông số tối ưu thỏa mãn hai mục tiêu, mà còn cho thấy chất lượng bề mặt vi lỗ được cải thiện đáng kể khi gia công ở chế độ tối ưu [60]. Tương tự, Peng Zhang và cộng sự (2023) kết hợp mô phỏng động lực học chất lưu và thuật toán mạng Neural di truyền để dự đoán và tối ưu hóa đa mục tiêu cho quá trình *micro-EDM* có siêu âm trên hợp kim Ti6Al4V; với bộ thông số tối ưu thu được, nhóm tác giả đã thực nghiệm và đạt *MRR* tăng gấp bốn lần, trong khi tốc độ mòn dụng cụ và góc côn lỗ giảm khoảng 50% so với chế độ thông thường [87].

Ngoài ra, nghiên cứu so sánh của Gholipour và cộng sự (2020) giữa *EDM* có siêu âm và *EDM* có từ trường hỗ trợ cũng khẳng định hiệu quả vượt trội của rung siêu âm: *MRR* và chất lượng bề mặt của mẫu gia công bằng *EDM* rung siêu âm đều cao hơn so với *EDM* có từ trường, cho thấy rung động siêu âm là giải pháp hữu hiệu hơn trong hai phương pháp hỗ trợ [58]. Nhìn chung, sự kết hợp giữa thực nghiệm và các công cụ mô phỏng, tối ưu hóa hiện đại đã và đang mở ra hướng mới để điều chỉnh quá trình *EDM* đạt hiệu suất cao nhất, đáp ứng đồng thời nhiều tiêu chí kỹ thuật.

Từ các phân tích các công trình nghiên cứu nêu trên, có thể thấy rõ xu hướng và tính cấp thiết của việc tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình *EDM* nhằm thỏa mãn đồng thời yêu cầu về năng suất và chất lượng. Mặc dù nhiều tiên bộ đã đạt được, vẫn còn những khoảng trống nghiên cứu cần được tiếp tục quan tâm. Chẳng hạn, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào *EDM* lỗ, hốc, lỗ sâu hoặc bề mặt phẳng, hay *EDM* lỗ vi mô. Việc áp dụng các kỹ thuật tối ưu hóa cho *EDM* trên bề mặt trụ ngoài của vật liệu thép 90CrSi chưa được nghiên cứu đầy đủ. Thép 90CrSi là loại thép hợp kim dụng cụ được sử dụng phổ biến làm dụng cụ hoặc khuôn mẫu. Do đó đòi hỏi bề mặt gia công phải có độ nhẵn cao trong khi năng suất gia công phải đảm bảo hiệu quả kinh tế. *EDM* với điện cực graphite là một trong những lựa chọn phù hợp để gia công thép cứng nhờ ưu điểm điện cực graphite có nhiệt độ nóng chảy cao, tốc độ mòn thấp và dẫn điện tốt, cho phép phóng tia ổn định ngay cả ở chế độ dòng điện xung cao. Tuy nhiên, để đạt được độ nhám bề mặt *Ra* nhỏ nhất, *HWR* nhỏ nhất, đồng thời với *MRR* lớn nhất trên vật liệu này, cần có nghiên cứu bài bản nhằm xác định bộ thông số công nghệ tối ưu. Dựa trên nền tảng các kết quả tiên tiến đã được công bố như đã nêu, nghiên cứu này tập trung vào bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình gia công xung điện bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi với điện cực graphite, với ba mục tiêu: giảm thiểu độ nhám bề mặt

(Ra) và tốc độ mòn điện cực (HWR), tối đa hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR).

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*

Dữ liệu thực nghiệm thu được từ quá trình gia công thường không tuân theo phân phối chuẩn, dẫn đến sai lệch trong mô hình hồi quy và ảnh hưởng đến hiệu suất của quá trình tối ưu hóa. Do đó, việc biến đổi dữ liệu nhằm làm giảm độ lệch (*skewness*) và đưa dữ liệu về gần phân phối chuẩn là cần thiết trước khi mô hình hóa. Một trong những phương pháp phổ biến và hiệu quả để đạt được điều này là biến đổi *Box-Cox*.

Biến đổi *Box-Cox* là một kỹ thuật biến đổi dữ liệu do Box và Cox (1964) đề xuất, giúp cải thiện tính đối xứng của phân phối và ổn định phương sai. Phép biến đổi áp dụng cho các giá trị dương và được định nghĩa như sau [91]:

$$y^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln(y), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

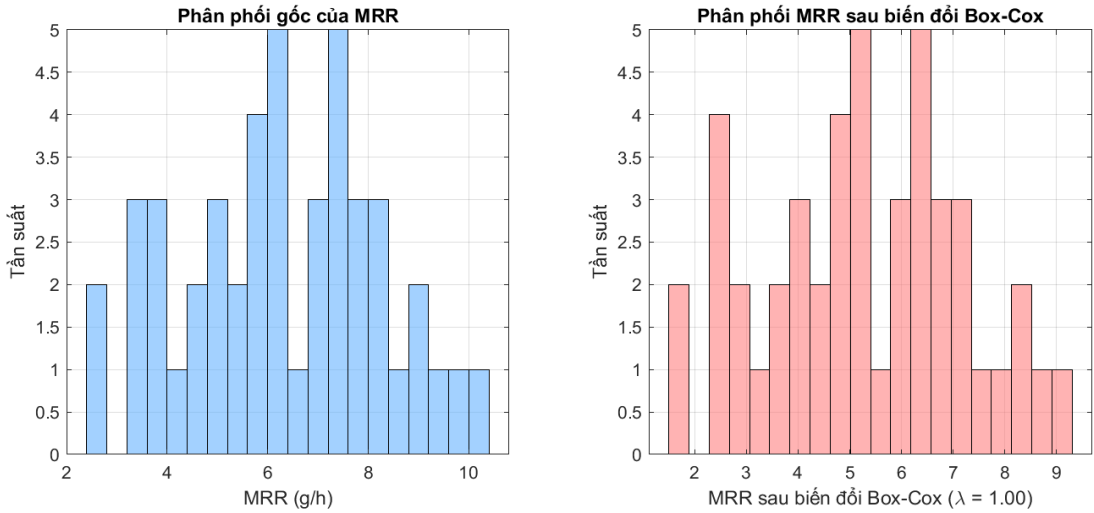
Trong đó $y^{(\lambda)}$ là giá trị sau biến đổi; λ là tham số biến đổi, xác định hình dạng của phân phối sau biến đổi.

Trong nghiên cứu này, 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:

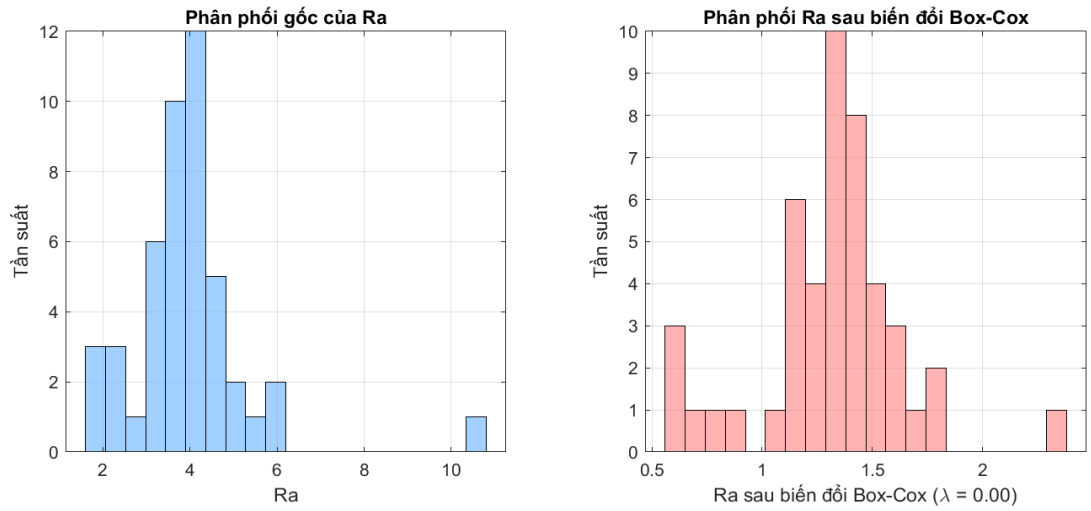
- MRR có λ tối ưu = 1,00 tức là không cần biến đổi (phân phối gốc đã tương đối chuẩn).
- Ra có λ tối ưu $\approx 0,00$ tức là nên áp dụng biến đổi logarit: $\log(Ra)$.
- HWR có λ tối ưu $\approx 0,4$ tức là nên áp dụng nén để giảm độ lệch dương.

$$Y^{(0,4)} = \frac{Y^{0,4} - 1}{0,4} \quad (4.2)$$

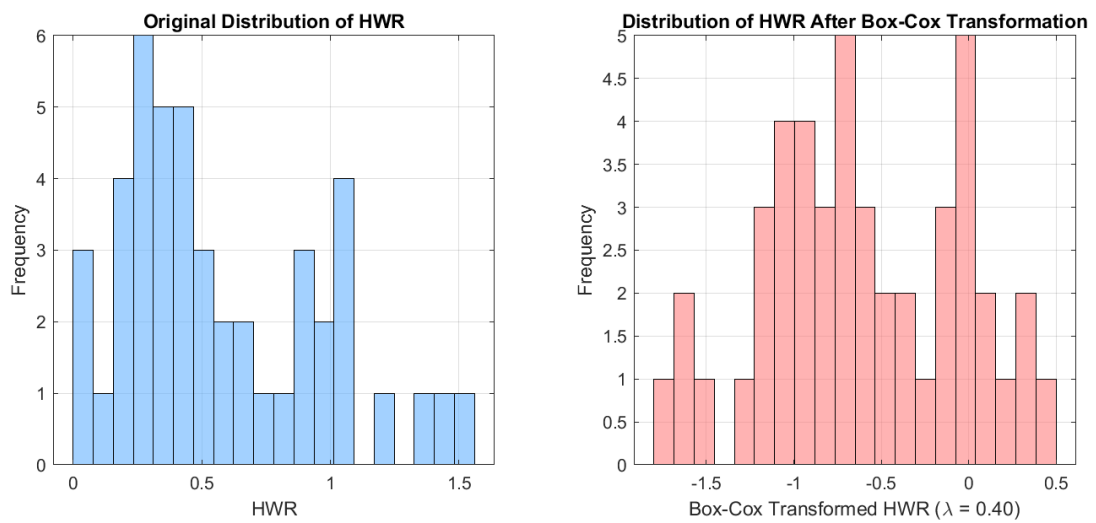
Phân phối trước và sau biến đổi được trình bày lần lượt trong Hình 4.1, Hình 4.2 và Hình 4.3. Kết quả cho thấy độ lệch phân phối đã được giảm đáng kể, giúp đảm bảo điều kiện áp dụng cho các mô hình hồi quy tiếp theo như *GPR*.



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

Trong nghiên cứu này, mục tiêu là tối ưu hóa đồng thời ba chỉ tiêu chất lượng trong quá trình gia công xung điện: tối đa hóa tốc độ bóc tách vật liệu (*MRR*), giảm thiểu độ nhám bề mặt (*Ra*) và tối thiểu hoá tốc độ mòn điện cực (*HWR*). Đây là bài toán điển hình của tối ưu hóa đa mục tiêu mâu thuẫn, đòi hỏi tìm một tập hợp nghiệm không bị chi phối – gọi là biên Pareto. Để giải bài toán này, 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, được đề xuất bởi Deb cùng cộng sự (2002) [20].

b) Hàm mục tiêu

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

$$\text{Maximize } f_1(x) = MRR(x) \quad (4.3)$$

$$\text{Minimize } f_2(x) = Ra(x) \quad (4.4)$$

$$\text{Minimize } f_3(x) = HWR(x) \quad (4.5)$$

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 của thuật toán được thiết lập như sau:

- Số biến thiết kế: Bài toán tối ưu có 5 biến thiết kế, bao gồm biên độ rung siêu âm A , thời gian phóng điện T_{on} , thời gian ngắt xung T_{off} , dòng điện xung I_p và điện áp servo SV .
- Kích thước quần thể (*Population Size*): Kích thước quần thể được chọn là 200 cá thể, nhằm đảm bảo tính đa dạng của nghiệm và khả năng bao phủ tốt không gian tìm kiếm trong bài toán tối ưu ba mục tiêu.
- Số thế hệ tối đa (*Maximum Generations*): Thuật toán được cho phép tiến hóa tối đa 200 thế hệ, đủ lớn để biên Pareto hội tụ ổn định mà không làm tăng chi phí tính toán quá mức.
- Xác suất lai ghép (*Crossover Fraction*): Tỷ lệ lai ghép được thiết lập ở mức 0,8 tức là 80% cá thể trong mỗi thế hệ mới được tạo ra thông qua toán tử lai ghép. Giá trị này giúp tăng cường khả năng khai thác (*exploitation*) các vùng nghiệm tiềm năng.
- Xác suất đột biến (*Mutation Probability*): Trong cấu hình sử dụng, xác suất đột biến được áp dụng ở mức cá thể thông qua hàm *mutationadaptfeasible*,

cho phép thuật toán tự điều chỉnh cường độ đột biến nhằm duy trì tính khả thi của nghiệm trong miền ràng buộc. Ở các thế hệ đầu, đột biến có biên độ lớn hơn nhằm tăng cường khả năng khám phá không gian tìm kiếm; trong khi ở các thế hệ sau, biên độ đột biến giảm dần để hỗ trợ quá trình hội tụ. Toán tử *mutationadaptfeasible* đảm bảo rằng các nghiệm sinh ra sau đột biến vẫn nằm trong miền khả thi, từ đó nâng cao hiệu quả tìm kiếm và tránh phát sinh các nghiệm không thỏa ràng buộc.

- Tỷ lệ gen đột biến (*Mutation Rate / Gene Mutation Rate*): Đối với mỗi cá thể được chọn đột biến, tỷ lệ gen bị đột biến là nhỏ, do toán tử *mutationadaptfeasible* chỉ gây nhiễu nhẹ trên một số biến thiết kế, giúp tăng khả năng khám phá không gian nghiệm mà không làm mất ổn định quá trình tiến hóa.
- Tiêu chí dừng (*Stopping Criterion*): Ngoài giới hạn số thế hệ, thuật toán sử dụng tiêu chí dừng dựa trên độ thay đổi trung bình của độ phân tán biên *Pareto* với ngưỡng $FunctionTolerance = 10^{-6}$. Khi mức cải thiện của biên *Pareto* giữa các thế hệ liên tiếp nhỏ hơn ngưỡng này, thuật toán sẽ tự động dừng.

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

Trong bài toán tối ưu đa mục tiêu, thuật toán *NSGA-II* cung cấp một tập nghiệm *Pareto* không bị trội, phản ánh các phương án thỏa hiệp khác nhau giữa các mục tiêu xung đột. Tuy nhiên, để lựa chọn một phương án cụ thể phục vụ triển khai thực tế, cần áp dụng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (*Multi-Criteria Decision Making - MCDM*).

Trong nghiên cứu này, bốn phương pháp *MCDM* gồm *AHP*, *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS* được sử dụng nhằm đánh giá, xếp hạng và so sánh các nghiệm *Pareto* trên cùng một cơ sở khoa học.

a) Phương pháp *AHP*

Phương pháp *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*) được sử dụng trong nghiên cứu này nhằm lựa chọn phương án tối ưu từ tập nghiệm *Pareto* dựa trên mức độ ưu tiên của các tiêu chí. *AHP* cho phép lượng hóa mức độ quan trọng tương đối giữa các tiêu chí thông qua so sánh cặp và đánh giá tính nhất quán của các nhận định, từ đó xác định trọng số tiêu chí một cách có hệ thống.

Trong bài toán tối ưu quá trình *EDM* có hỗ trợ rung động siêu âm, ba tiêu chí được xem xét bao gồm tốc độ bóc vật liệu (*MRR*), độ nhám bề mặt (*Ra*) và tốc độ mòn điện cực (*HWR*), trong đó *MRR* là tiêu chí lợi ích (cần tối đa hóa), còn *Ra* và *HWR* là các tiêu chí chi phí (cần tối thiểu hóa).

Quy trình thực hiện *AHP* trong nghiên cứu gồm các bước:

(1) Xây dựng ma trận so sánh cặp

Ma trận so sánh cặp giữa các tiêu chí được xây dựng theo thang đo *Saaty*:

$$A = [a_{ij}]_{n \times n}, a_{ii} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} > 0 \quad (4.6)$$

Trong đó, a_{ij} biểu thị mức độ quan trọng của tiêu chí i so với tiêu chí j , và n là số tiêu chí (trong nghiên cứu này $n=3$).

(2) Xác định trọng số tiêu chí bằng phương pháp vector riêng

Trọng số các tiêu chí được xác định thông qua *vector* riêng tương ứng với trị riêng lớn nhất của ma trận so sánh cặp. Bài toán trị riêng được viết như sau:

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (4.7)$$

Trong đó λ_{\max} là trị riêng lớn nhất của ma trận A , và w là *vector* riêng tương ứng. *Vector* trọng số sau đó được chuẩn hóa để đảm bảo tổng các trọng số bằng 1:

$$w_i = \frac{\tilde{w}_i}{\sum_{k=1}^n \tilde{w}_k}, i = 1, \dots, n \quad (4.8)$$

với \tilde{w} là *vector* riêng chưa chuẩn hóa.

(3) Kiểm tra tính nhất quán của ma trận so sánh

Mức độ nhất quán của các đánh giá được kiểm tra thông qua chỉ số nhất quán (CI) và tỷ số nhất quán (CR):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (4.9)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.10)$$

Trong đó RI là chỉ số ngẫu nhiên (*Random Index*) phụ thuộc vào số tiêu chí n . Ma trận so sánh cặp được xem là chấp nhận được nếu:

$$CR < 0.10 \quad (4.11)$$

(4) Chuẩn hóa các tiêu chí theo hướng “tốt hơn”

Để có thể tổng hợp các tiêu chí có đơn vị và chiều hướng tối ưu khác nhau, các giá trị tiêu chí được chuẩn hóa về khoảng $[0, 1]$ bằng phương pháp *min-max normalization*, có xét đến hướng tối ưu của từng tiêu chí.

Gọi x_i là giá trị của một tiêu chí tại phương án i , x_{\min} và x_{\max} lần lượt là giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của tiêu chí đó trong tập phương án.

- Đối với tiêu chí lợi ích (*maximize*), như MRR :

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4.12)$$

- Đối với tiêu chí chi phí (*minimize*), như Ra và HWR :

$$y_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4.13)$$

Giá trị y_i càng lớn thì phương án i càng tốt theo tiêu chí tương ứng.

(5) Tính điểm tổng hợp AHP và lựa chọn phương án tối ưu

Điểm tổng hợp *AHP* của phương án i được xác định bằng cách kết hợp tuyến

tính các tiêu chí đã chuẩn hóa với trọng số tương ứng:

$$S_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} w_j \quad (4.14)$$

Trong đó y_{ij} là giá trị chuẩn hóa của tiêu chí j tại phương án i , và w_j là trọng số của tiêu chí j .

Phương án tối ưu theo *AHP* được xác định theo quy tắc:

$$i^* = \arg \max_i S_i \quad (4.15)$$

b) Phương pháp *TOPSIS*

Trong nghiên cứu này, phương pháp *TOPSIS* (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) được sử dụng để giải quyết bài toán ra quyết định đa tiêu chí (*MCDM*) nhằm lựa chọn phương án tối ưu từ tập nghiệm *Pareto* thu được bằng thuật toán *NSGA-II*. Nguyên lý cơ bản của *TOPSIS* là lựa chọn phương án có khoảng cách ngắn nhất tới nghiệm lý tưởng tốt nhất và khoảng cách xa nhất tới nghiệm lý tưởng xấu nhất.

Để áp dụng phương pháp *TOPSIS* một cách hiệu quả, các bước thực hiện được tiến hành tuần tự như sau [92]:

Bước 1. Xây dựng ma trận quyết định

Ma trận quyết định được thiết lập dưới dạng:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{mn} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Trong đó x_{mn} là giá trị của tiêu chí thứ n tại phương án (biến thể) thứ m .

Bước 2. Chuẩn hóa ma trận quyết định

Các giá trị trong ma trận quyết định được chuẩn hóa nhằm loại bỏ ảnh hưởng của đơn vị đo khác nhau, theo công thức:

$$k_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4.17)$$

Bước 3. Xác định ma trận quyết định chuẩn hóa có trọng số

Ma trận chuẩn hóa có trọng số được xác định bằng:

$$l_{ij} = w_j \times k_{ij} \quad (4.18)$$

Trong đó w_j là trọng số của tiêu chí thứ j , được xác định thông qua phương pháp *Entropy*.

Bước 4. Xác định nghiệm lý tưởng tốt nhất và xấu nhất

Nghiệm lý tưởng tốt nhất A^+ và nghiệm lý tưởng xấu nhất A^- được xác định như sau:

$$A^+ = \{l_1^+, l_2^+, \dots, l_j^+, \dots, l_n^+\} \quad (4.19)$$

$$A^- = \{l_1^-, l_2^-, \dots, l_j^-, \dots, l_n^-\} \quad (4.20)$$

Trong đó l_j^+ và l_j^- lần lượt là giá trị tốt nhất và xấu nhất của tiêu chí thứ j ($j = 1, 2, \dots, n$), tùy thuộc vào việc tiêu chí đó là tiêu chí lợi ích hay tiêu chí chi phí.

Bước 5. Tính khoảng cách tới nghiệm lý tưởng.

Khoảng cách của mỗi phương án tới nghiệm lý tưởng tốt nhất và xấu nhất được xác định bằng khoảng cách *Euclid*:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - l_j^+)^2} \quad (4.21)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - l_j^-)^2} \quad (4.22)$$

với $i = 1, 2, \dots, m$.

Bước 6. Xác định chỉ số ưu tiên của từng phương án

Chỉ số ưu tiên R_i của mỗi phương án được xác định theo công thức:

$$R_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (4.23)$$

Trong đó $0 \leq R_i \leq 1$.

Bước 7. Xếp hạng các phương án

Các phương án được xếp hạng theo thứ tự giảm dần của chỉ số R_i . Phương án có giá trị R_i lớn nhất được xem là phương án tối ưu theo phương pháp *TOPSIS*.

c) Phương pháp *EAMR*

Trong nghiên cứu này, phương pháp *EAMR* (*Evaluation based on Average and Modified Ratio*) được sử dụng để giải quyết bài toán ra quyết định đa tiêu chí (*MCDM*) nhằm xếp hạng và lựa chọn phương án tối ưu từ tập nghiệm Pareto. *EAMR* cho phép tổng hợp ý kiến của nhiều người ra quyết định và xử lý đồng thời các tiêu chí lợi ích và chi phí thông qua giá trị trung bình và tỷ số đánh giá đã hiệu chỉnh. Để áp dụng phương pháp *EAMR* một cách hiệu quả, các bước thực hiện được tiến hành nghiêm ngặt theo trình tự sau [93].

Bước 1. Xây dựng ma trận quyết định

Ma trận quyết định được xác định dưới dạng:

$$X_d = \begin{bmatrix} x_{11}^d & \dots & x_{1n}^d \\ x_{21}^d & \dots & x_{2n}^d \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1}^d & \dots & x_{mn}^d \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Trong đó $1 \leq d \leq k$; d biểu thị số thứ tự của người ra quyết định, x_{ij}^d là giá trị của tiêu chí thứ j đối với phương án thứ i do người ra quyết định thứ d đánh giá.

Bước 2. Tính giá trị trung bình của từng phương án

Giá trị trung bình của mỗi tiêu chí đối với từng phương án được xác định bằng:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{k}(x_{ij}^1 + x_{ij}^2 + \dots + x_{ij}^k) \quad (4.25)$$

Bước 3. Xác định trọng số của các tiêu chí

Trọng số của từng tiêu chí được xác định dựa trên đánh giá của các người ra quyết định, phản ánh mức độ quan trọng tương đối của từng tiêu chí trong bài toán.

Bước 4. Tính trọng số trung bình của các tiêu chí

Trọng số trung bình của tiêu chí thứ j được xác định theo:

$$\bar{w}_j = \frac{1}{k}(w_j^1 + w_j^2 + \dots + w_j^k) \quad (4.26)$$

Bước 5. Chuẩn hóa các giá trị đánh giá

Giá trị chuẩn hóa n_{ij} được tính bằng:

$$n_{ij} = \frac{\bar{x}_{ij}}{e_j} \quad (4.27)$$

Trong đó e_j được xác định theo:

$$e_j = \max_{i \in \{1, \dots, m\}}(\bar{x}_{ij}) \quad (4.28)$$

Bước 6. Xác định giá trị chuẩn hóa có trọng số

Giá trị chuẩn hóa có trọng số được tính bằng:

$$v_{ij} = n_{ij} \cdot \bar{w}_j \quad (4.29)$$

Bước 7. Tính điểm chuẩn hóa của các tiêu chí

Điểm chuẩn hóa của mỗi phương án được xác định riêng cho từng loại tiêu chí:

+) Đối với mục tiêu MRR (tiêu chí lợi ích):

$$G_i^+ = v_{i1}^+ + v_{i2}^+ + \dots + v_{im}^+ \quad (4.30)$$

+) Đối với mục tiêu Ra và HWR (tiêu chí chi phí):

$$G_i^- = v_{i1}^- + v_{i2}^- + \dots + v_{im}^- \quad (4.31)$$

Bước 8. Xác định giá trị xếp hạng (RV)

Các giá trị xếp hạng RV được xác định dựa trên G_i^+ và G_i^- nhằm phản ánh mức độ ưu tiên tương đối của từng phương án.

Bước 9. Tính điểm đánh giá tổng hợp và xếp hạng phương án

Điểm đánh giá tổng hợp của từng phương án được xác định bằng:

$$S_i = \frac{RV(G_i^+)}{RV(G_i^-)} \quad (4.32)$$

Phương án có giá trị S_i lớn nhất được xem là phương án tối ưu theo phương pháp $EAMR$.

d) Phương pháp $EDAS$

Trong nghiên cứu này, phương pháp $EDAS$ (*Evaluation based on Distance from Average Solution*) được sử dụng để giải quyết bài toán ra quyết định đa tiêu chí ($MCDM$) nhằm lựa chọn phương án tối ưu từ tập nghiệm *Pareto*. Khác với $TOPSIS$

dựa trên nghiệm lý tưởng, *EDAS* đánh giá các phương án thông qua khoảng cách đến nghiệm trung bình, nhờ đó làm giảm ảnh hưởng của các giá trị cực trị và tăng tính ổn định của quyết định. Để áp dụng phương pháp *EDAS* một cách hiệu quả, các bước thực hiện được tiến hành theo trình tự sau [94].

Bước 1. Xây dựng ma trận quyết định ban đầu

Ma trận quyết định được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mj} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4.33)$$

Trong đó m là số lượng phương án và n là số lượng tiêu chí.

Bước 2. Tính giá trị trung bình của từng tiêu chí

Giá trị trung bình của tiêu chí thứ j được xác định theo công thức:

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^m r_{ij}}{m} \quad (4.34)$$

Bước 3. Xác định khoảng cách dương (*PDA*) và khoảng cách âm (*NDA*)

Khoảng cách từ mỗi phương án đến nghiệm trung bình được xác định khác nhau tùy theo loại tiêu chí.

+) Đối với tiêu chí lợi ích (*MRR*):

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (r_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (4.35)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - r_{ij}))}{AV_j} \quad (4.36)$$

+) Đối với tiêu chí chi phí (*Ra* và *HWR*):

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - r_{ij}))}{AV_j} \quad (4.37)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (r_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (4.38)$$

Bước 4. Tính tổng khoảng cách dương và âm có trọng số

Các khoảng cách dương và âm có trọng số được xác định theo:

$$SP_i = \sum_{j=1}^n PDA_{ij} \cdot w_j \quad (4.39)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n NDA_{ij} \cdot w_j \quad (4.40)$$

Trong đó w_j là trọng số của tiêu chí thứ j .

Bước 5. Chuẩn hóa khoảng cách dương và âm

Các giá trị chuẩn hóa được xác định như sau:

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)} \quad (4.41)$$

$$NSN_i = \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)} \quad (4.42)$$

Bước 6. Xác định điểm đánh giá của từng phương án

Điểm đánh giá (*Appraisal Score*) của mỗi phương án được tính bằng:

$$AS_i = (NSP_i + NSN_i)/2 \quad (4.43)$$

Bước 7. Xếp hạng các phương án

Các phương án được sắp xếp theo thứ tự giảm dần của chỉ số AS_i . Phương án có giá trị AS_i lớn nhất được xem là phương án tối ưu theo phương pháp *EDAS*.

e) Phương pháp *Entropy* xác định trọng số tiêu chí

Trong nghiên cứu này, phương pháp *Entropy* được sử dụng để xác định trọng số của các tiêu chí trong các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí như *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS*. Phương pháp *Entropy* là một kỹ thuật xác định trọng số khách quan, dựa trên mức độ phân tán thông tin của dữ liệu, do đó không phụ thuộc vào đánh giá chủ quan của chuyên gia. Tiêu chí có mức độ biến thiên lớn hơn sẽ chứa nhiều thông tin hơn và được gán trọng số cao hơn trong quá trình ra quyết định.

Quy trình xác định trọng số bằng phương pháp *Entropy* được thực hiện theo các bước sau [95].

Bước 1. Chuẩn hóa giá trị của các chỉ tiêu

Giá trị chuẩn hóa của tiêu chí thứ j tại phương án thứ i xác định theo công thức:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{m + \sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (4.44)$$

Trong đó m là số lượng phương án và x_{ij} là giá trị ban đầu của tiêu chí thứ j tại phương án thứ i .

Bước 2. Xác định *Entropy* của từng tiêu chí

Entropy của tiêu chí thứ j được xác định bằng:

$$me_j = - \sum_{i=1}^m [p_{ij} \times \ln(p_{ij})] - (1 - \sum_{i=1}^m p_{ij}) \times \ln(1 - \sum_{i=1}^m p_{ij}) \quad (4.45)$$

Giá trị me_j phản ánh mức độ hỗn loạn (không chắc chắn) của tiêu chí thứ j . Giá trị *Entropy* càng lớn thì mức độ phân biệt của tiêu chí càng thấp, và ngược lại.

Bước 3. Xác định trọng số của từng tiêu chí

Trọng số của tiêu chí thứ j được xác định theo công thức:

$$w_j = \frac{1 - me_j}{\sum_{j=1}^m (1 - me_j)} \quad (4.46)$$

Trong đó, tiêu chí có giá trị *Entropy* nhỏ hơn sẽ được gán trọng số lớn hơn do chứa nhiều thông tin hữu ích hơn trong quá trình đánh giá.

4.3 Kết quả tối ưu và phân tích tập nghiệm *Pareto*

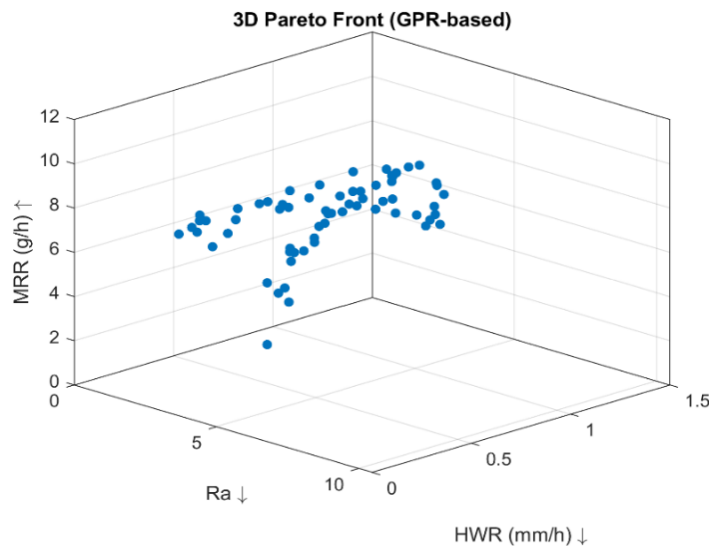
Sau khi xây dựng các mô hình dự đoán *MRR*, *Ra* và *HWR* bằng phương pháp *GPR*, thuật toán *NSGA-II* được áp dụng để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu cho quá

trình EDM có hỗ trợ rung động siêu âm. Kết quả tối ưu thu được là một tập nghiệm *Pareto* không bị trội, phản ánh các phương án đánh đổi khác nhau giữa năng suất gia công, chất lượng bề mặt và mức độ mòn điện cực.

4.3.1 Tập nghiệm *Pareto* trong không gian ba mục tiêu

Tập nghiệm *Pareto* trong không gian ba chiều (*MRR-Ra-HWR*) được thể hiện trong Hình 4.4. Hình này cho thấy rõ sự tồn tại của mối quan hệ xung đột giữa ba mục tiêu. Cụ thể, các nghiệm có tốc độ bóc vật liệu cao (*MRR* lớn) thường đi kèm với độ nhám bề mặt (*Ra*) và tốc độ mòn điện cực (*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 của 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.

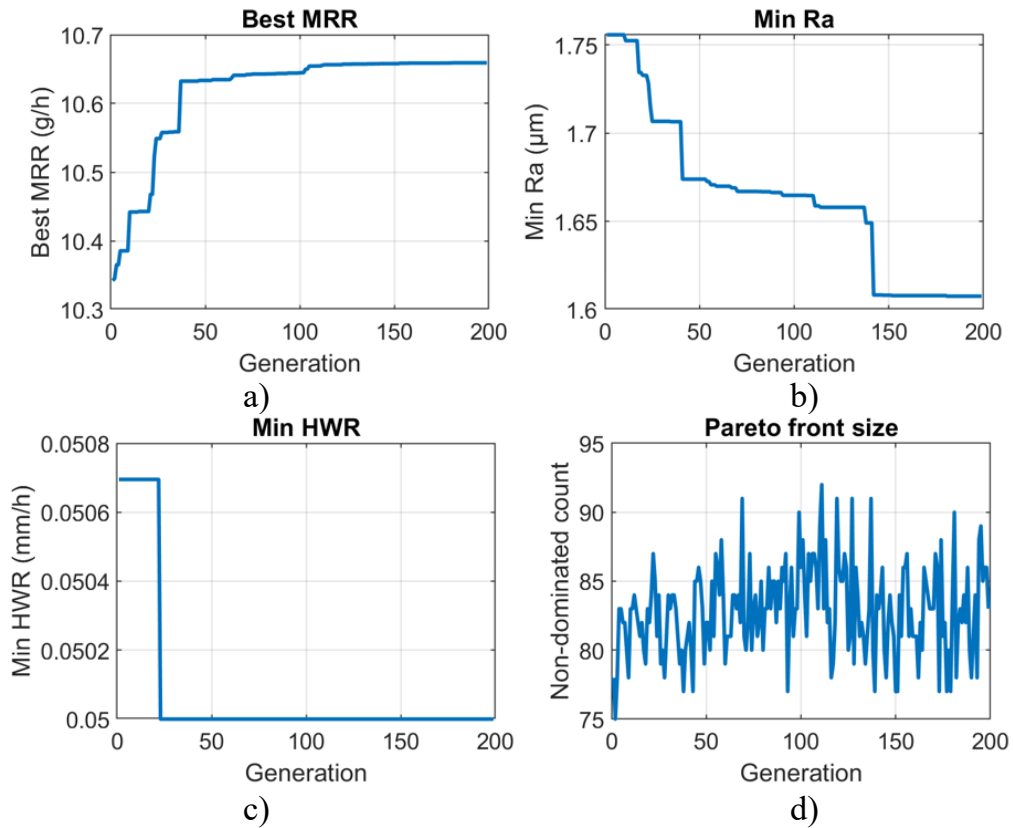


Hình 4.4 Tập nghiệm *Pareto* 3D giữa *MRR*, *Ra* và *HWR* thu được từ *NSGA-II*

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

Để đánh giá 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. Có thể nhận thấy rằng giá trị *MRR* tốt nhất tăng nhanh trong các thế hệ đầu, đặc biệt trong khoảng từ thế hệ 1 đến khoảng thế hệ 40–50, sau đó tăng chậm và dần ổn định khi số thế hệ tiếp tục tăng. Điều này cho thấy khả năng khai thác hiệu quả của *NSGA-II* trong giai đoạn đầu và xu hướng hội tụ rõ rệt ở các thế hệ sau.

Đối với độ nhám bề mặt *Ra*, giá trị nhỏ nhất giảm mạnh trong giai đoạn đầu và tiếp tục giảm chậm, tiệm cận về một giá trị ổn định sau khoảng thế hệ 120. Xu hướng tương tự cũng được quan sát đối với *HWR*, trong đó giá trị nhỏ nhất nhanh chóng đạt ngưỡng thấp và duy trì ổn định trong phần lớn quá trình tối ưu, cho thấy ràng buộc và hàm mục tiêu liên quan đến mòn điện cực được kiểm soát hiệu quả.



Hình 4.5 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.

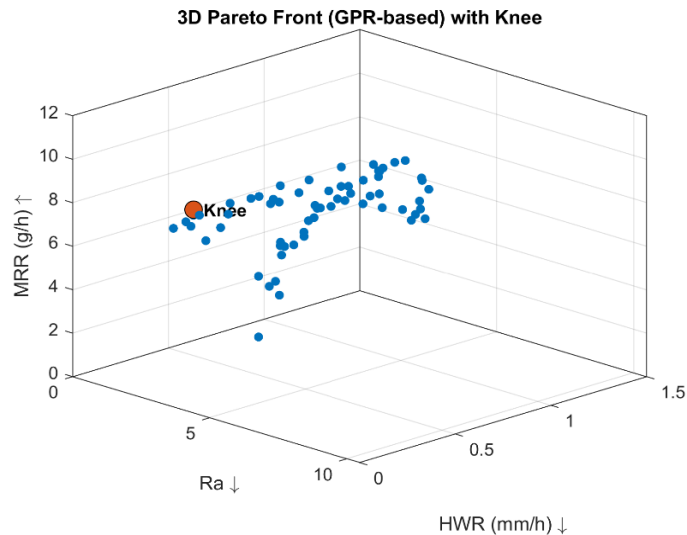
Ngoài ra, số lượng nghiệm không bị trội (*Pareto front size*) dao động quanh một giá trị gần như ổn định sau một số thế hệ nhất định, phản ánh rằng cấu trúc của tập nghiệm *Pareto* không còn thay đổi đáng kể khi thuật toán tiến gần tới điều kiện dừng. Sự ổn định đồng thời của các chỉ số này cho thấy thuật toán đã đạt *NSGA-II* trạng thái hội tụ trước khi kết thúc tại số thế hệ cực đại, phù hợp với các điều kiện dừng đã thiết lập trong quá trình tối ưu.

Như vậy, đồ thị hội tụ trong Hình 4.6 cung cấp bằng chứng trực quan cho thấy thuật toán *NSGA-II* hội tụ ổn định, đảm bảo độ tin cậy của tập nghiệm *Pareto* được sử dụng cho các bước phân tích và ra quyết định tiếp theo trong Chương này.

4.3.3 Xác định và phân tích điểm *knee* trên *Pareto front*

Nhằm lựa chọn một nghiệm đại diện từ tập nghiệm *Pareto*, điểm *knee* (điểm gó) đã được xác định trên *Pareto front* và thể hiện trực quan trong Hình 4.6 (*Pareto 3D* có đánh dấu *knee*) cũng như đối chiếu trên các đồ thị *Pareto* hai chiều ở Hình 4.8. Điểm *knee* được hiểu là nghiệm tại đó lợi ích cải thiện thêm của một mục tiêu bắt đầu giảm mạnh, trong khi mức đánh đổi lên các mục tiêu còn lại tăng nhanh; do đó, *knee* thường được xem như nghiệm có tỷ lệ đánh đổi “hiệu quả” nhất trong không gian đa mục tiêu.

Từ kết quả chương trình *Matlab*, điểm *knee* tương ứng với bộ thông số đầu vào $A = 3,086132 \mu\text{m}$, $T_{on} = 15,798762 \mu\text{s}$, $T_{off} = 12,740683 \mu\text{s}$, $I_p = 8,233868 \text{ A}$ và $SV = 4,600083 \text{ V}$, cho các đầu ra $MRR = 8,567433 \text{ g/h}$, $Ra = 3,380038 \mu\text{m}$ và $HWR = 0,148105 \text{ mm/h}$. Vị trí của nghiệm này trên Hình 4.6 cho thấy điểm *knee* nằm ở vùng trung gian của *Pareto front*: *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*

So sánh định lượng với các nghiệm cực trị trên *Pareto front* cho thấy ý nghĩa của điểm *knee* là rất rõ ràng. Cụ thể, nghiệm có *MRR* cực đại trên tập nghiệm *Pareto* đạt $MRR = 10,844244 \text{ g/h}$, tuy nhiên đi kèm $Ra = 8,619250 \mu\text{m}$ và $HWR = 0,588397 \text{ mm/h}$; điều này phản ánh việc theo đuổi *MRR* cực đại sẽ làm suy giảm đáng kể chất lượng bề mặt (*Ra* tăng mạnh) và đẩy *HWR* lên gần vùng giới hạn, tức là đánh đổi lớn về chất lượng và độ bền điện cực. Ngược lại, nghiệm có *Ra* nhỏ nhất đạt $Ra = 1,420775 \mu\text{m}$ nhưng chỉ cho $MRR = 5,443203 \text{ g/h}$ và $HWR = 1,074591 \text{ mm/h}$, trong đó *HWR* vượt xa mức chấp nhận trong sản xuất; nghĩa là tối ưu mạnh về *Ra* không đồng nghĩa tối ưu tổng thể theo yêu cầu công nghệ. Ngoài ra, nghiệm có *HWR* nhỏ nhất đạt $HWR = 0,050000 \text{ mm/h}$ với $MRR = 7,826944 \text{ g/h}$ nhưng $Ra = 4,512373 \mu\text{m}$, vượt ngưỡng *Ra* cho phép của doanh nghiệp, do đó không phù hợp khi xét ràng buộc ứng dụng.

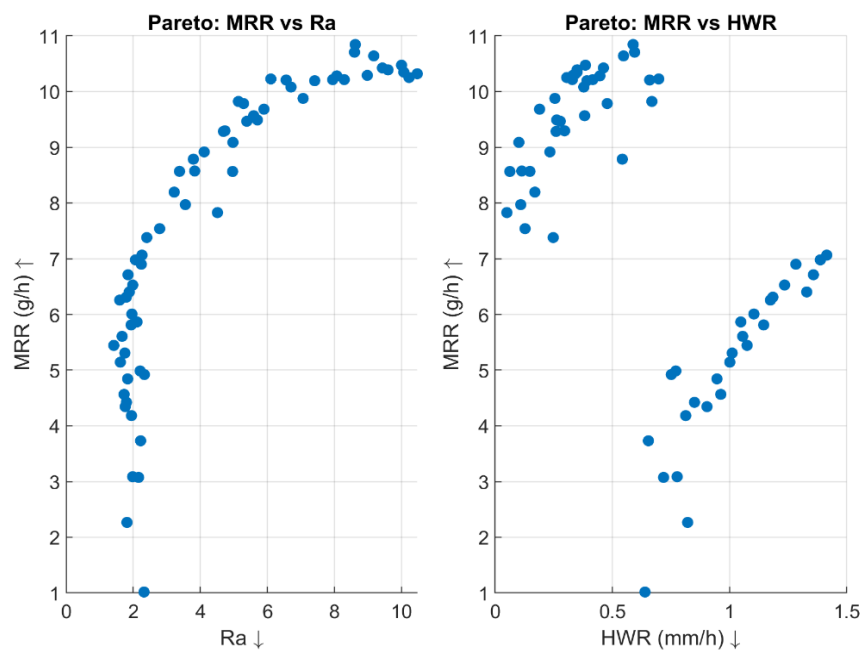
Đặc biệt, khi xét theo ràng buộc thực tế (từ doanh nghiệp Cơ khí Chính xác Thái Hà) ($Ra \leq 4 \mu\text{m}$ và $HWR \leq 0.6 \text{ mm/h}$), tập nghiệm khả thi vẫn tồn tại các phương án có *MRR* cao; nghiệm có *MRR* lớn nhất trong tập khả thi đạt $MRR = 8,786162 \text{ g/h}$ với $Ra = 3,793858 \mu\text{m}$ và $HWR = 0,542244 \text{ mm/h}$ (*HWR* tiệm cận ngưỡng 0.6). So với nghiệm khả thi-*MRR*-max này, điểm *knee* chỉ thấp hơn khoảng 2,55% về *MRR* nhưng lại có *HWR* thấp hơn rất đáng kể (0,148105 so với 0,542244) và *Ra* cũng thấp hơn (3,380038 so với 3,793858). Điều này cho thấy điểm *knee* mang tính “cân bằng

hiệu quả”: hy sinh rất ít MRR để đổi lấy mức giảm lớn về mòn điện cực và cải thiện chất lượng bề mặt, đồng thời nằm ổn định trên các mặt phẳng đánh đổi ở Hình 4.8.

Tóm lại, điểm *knee* được xác định trong Hình 4.6 không chỉ có ý nghĩa hình học trên *Pareto front* mà còn có ý nghĩa kỹ thuật rõ rệt: đây 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* (*AHP*, *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS*) trong các mục sau.

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

Để làm rõ hơn đặc điểm của tập nghiệm *Pareto*, các quan hệ đánh đổi giữa từng cặp mục tiêu được thể hiện trong Hình 4.7.



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

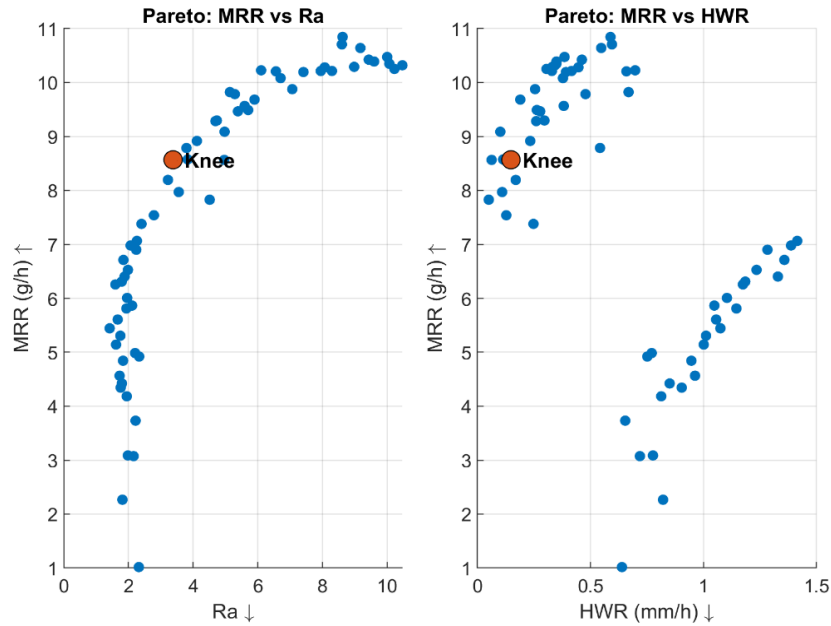
a. $MRR-Ra$ b. $MRR-HWR$ c. $Ra-HWR$.

Từ các đồ thị này có thể rút ra một số nhận xét chính:

- $MRR-Ra$: 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 bề mặt chi tiết và tuổi thọ điện cực.

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

Việc 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.



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

Kết quả cho thấy 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 củng cố vai trò của điểm knee như một nghiệm đại diện có ý nghĩa kỹ thuật và thực tiễn.

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 Pareto

Tập nghiệm Pareto thu được từ thuật toán $NSGA-II$ phản ánh đầy đủ các phương án đánh đổi giữa ba mục tiêu MRR , Ra và HWR . Tuy nhiên, để phục vụ triển

khai trong thực tế sản xuất, cần lựa chọn một phương án tối ưu đại diện từ tập *Pareto*. Do đó, trong nghiên cứu này, 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, mục tiêu ưu tiên là tối đa hóa *MRR*, trong khi đảm bảo các điều kiện bắt buộc về chất lượng và độ bền điện cực như sau:

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

Trên cơ sở đó, từ tập nghiệm *Pareto* ban đầu, các nghiệm không thỏa hai ràng buộc trên được loại bỏ. Phần còn lại tạo thành tập nghiệm khả thi, bao gồm các phương án có khả năng ứng dụng thực tế trong sản xuất. Việc xác định tập nghiệm khả thi giúp đảm bảo rằng mọi phương án được đưa vào bước ra quyết định tiếp theo đều đáp ứng yêu cầu kỹ thuật tối thiểu, tránh lựa chọn các nghiệm chỉ tối ưu về mặt toán học nhưng không phù hợp với thực tiễn.

4.4.2 Lựa chọn phương án theo *AHP*

Trong nghiên cứu này, phương pháp *AHP* được áp dụng trên toàn bộ tập nghiệm *Pareto* thu được từ thuật toán *NSGA-II* nhằm lựa chọn phương án tối ưu theo định hướng ưu tiên của doanh nghiệp. Trọng số các tiêu chí được xác định theo *AHP* cho thấy *MRR* là tiêu chí được ưu tiên cao nhất, tiếp theo là *Ra* và *HWR*, phản ánh rõ yêu cầu nâng cao năng suất gia công trong khi vẫn xem xét chất lượng bề mặt và mức độ mòn điện cực. Dựa trên 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*. Nghiệm này tương ứng với bộ thông số công nghệ $A = 3,079858 \mu\text{m}$, $T_{on} = 15,866091 \mu\text{s}$, $T_{off} = 12,925115 \mu\text{s}$, $I_p = 10,972303 \text{ A}$ 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 $HWR = 0,189407 \text{ mm/h}$. Với điểm tổng hợp *AHP* = 0,794196, đây là nghiệm được *AHP* đánh giá cao nhất trong toàn bộ tập nghiệm *Pareto*, chủ yếu nhờ giá trị *MRR* vượt trội so với các phương án còn lại.

Tuy nhiên, khi đối chiếu với các ràng buộc công nghệ của doanh nghiệp, cụ thể là $Ra \leq 4 \mu\text{m}$ và $HWR \leq 0,6 \text{ mm/h}$, có thể thấy rằng nghiệm tối ưu theo *AHP* không thuộc tập nghiệm khả thi, do giá trị *Ra* vượt quá giới hạn cho phép. Điều này cho thấy phương pháp *AHP*, với đặc trưng nhấn mạnh vào tiêu chí có trọng số lớn nhất, có xu hướng lựa chọn các nghiệm có năng suất rất cao nhưng chưa chắc đã đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về chất lượng bề mặt. So sánh với nghiệm tại điểm knee trên *Pareto front*, nghiệm *AHP* cho *MRR* cao hơn đáng kể nhưng phải đánh đổi bằng

sự suy giảm rõ rệt về chất lượng bề mặt. Do đó, trong khuôn khổ 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*) sẽ được tiếp tục áp dụng trên tập nghiệm khả thi nhằm lựa chọn phương án tối ưu phù hợp hơn cho ứng dụng sản xuất thực tế.

4.4.3 Lựa chọn phương án theo *TOPSIS*

Sau khi xác định tập nghiệm khả thi thỏa các ràng buộc công nghệ của doanh nghiệp ($Ra \leq 4 \mu\text{m}$, $HWR \leq 0,6 \text{ mm/h}$), phương pháp *TOPSIS* được áp dụng nhằm xếp hạng và lựa chọn phương án tối ưu dựa trên khoảng cách tới nghiệm lý tưởng dương và âm. Trọng số các tiêu chí được xác định bằng phương pháp *Entropy*, đảm bảo tính khách quan dựa trên mức độ phân tán của dữ liệu *Pareto*. 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, được trình bày ở Bảng 4.1.

Bảng 4.1 Kết quả tính toán và xếp hạng các nghiệm *Pareto* theo phương pháp *TOPSIS*.

Trial.	k_{ij}			l_{ij}			S_i^+	S_i^-	R_i	Rank
	Ra	HWR	MRR	Ra	HWR	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

Từ Bảng 4.1 có thể thấy, 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.

4.4.4 Lựa chọn phương án theo *EAMR*

Phương pháp *EAMR* tiếp tục được áp dụng trên cùng tập nghiệm khả thi, với trọng số các tiêu chí được xác định bằng phương pháp *Entropy*. *EAMR* cho phép đánh giá các phương án thông qua các chỉ số chuẩn hóa n_{ij} , giá trị có trọng số v_{ij} , các đại lượng G_i^+ , G_i^- , chỉ số tổng hợp S_i và thứ hạng tương ứng.

Các kết quả tính toán và xếp hạng theo *EAMR* được tổng hợp trong Bảng 4.2.

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

Trial.	n_{ij}			V_{ij}			G_i^-	G_i^+	S_i	Rank
	Ra	HWR	MRR	Ra	HWR	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

Từ Bảng 4.2, có thể nhận thấy Trial 55 tiếp tục đạt giá trị S_i lớn nhất ($Rank = 1$). 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.

4.4.5 Lựa chọn phương án theo *EDAS*

Tiếp theo, phương pháp *EDAS* được áp dụng để đánh giá các nghiệm khả thi dựa trên khoảng cách tới giá trị trung bình của từng tiêu chí. Phương pháp này sử dụng các đại lượng khoảng cách dương và âm (SP_i , SN_i), các giá trị chuẩn hóa (NSP_i , NSN_i) và chỉ số đánh giá tổng hợp AS_i . Kết quả tính toán chi tiết và xếp hạng theo *EDAS* được trình bày trong Bảng 4.3.

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

Trial.	SP_i'			NSP_i	NSN_i	AS_i	Rank
	<i>Ra</i>	<i>HWR</i>	<i>MRR</i>				
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
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

Từ 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.

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. Sự đồng thuận này khẳng định rằng phương án được lựa chọn không phụ thuộc vào bản chất riêng của từng phương pháp ra quyết định, mà thực sự đại diện cho một chế độ gia công ổn định, hiệu quả và phù hợp với yêu cầu thực tế của doanh nghiệp.

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

Bên cạnh các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (*AHP*, *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS*), nghiên cứu này đề xuất và áp dụng thêm một chiến lược lựa chọn phương án định hướng trực tiếp theo yêu cầu doanh nghiệp, được gọi là “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi”. Cách tiếp cận này phản ánh đúng thực tiễn sản xuất, trong đó năng suất gia công được ưu tiên tối đa, còn các chỉ tiêu chất lượng chỉ cần thỏa các giới hạn kỹ thuật cho phép.

Nguyên tắc và cách xác định: Phương án “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi” được xác định theo quy trình sau:

1. Xuất phát từ tập nghiệm *Pareto* thu được bằng thuật toán *NSGA-II* kết hợp với mô hình *GPR*.
2. Xác định tập nghiệm khả thi bằng cách loại bỏ các nghiệm không thỏa các ràng buộc công nghệ do doanh nghiệp đặt ra, cụ thể:
 - Độ nhám bề mặt: $Ra \leq 4 \mu\text{m}$
 - Tốc độ mòn điện cực: $HWR \leq 0,6 \text{ mm/h}$
3. Trong tập nghiệm khả thi còn lại, lựa chọn nghiệm có giá trị *MRR* lớn nhất.

Về bản chất, đây là một bài toán tối ưu đơn mục tiêu có ràng buộc, trong đó *MRR* đóng vai trò hàm mục tiêu, còn *Ra* và *HWR* là các ràng buộc cứng. Chiến lược này không thay thế các phương pháp *MCDM*, mà bổ sung một góc nhìn ra quyết định khác, gắn chặt với định hướng sản xuất thực tế.

Kết quả lựa chọn

Kết quả cho thấy, 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, đồng thời đạt năng suất gia công cao nhất trong số các nghiệm có thể chấp nhận về mặt kỹ thuật.

Có thể nhận thấy rằng nghiệm này nằm gần biên ràng buộc, đặc biệt đối với chỉ tiêu *HWR*, cho thấy việc tối đa hóa *MRR* trong tập nghiệm khả thi dẫn đến xu hướng khai thác mạnh năng lượng phóng điện. Tuy nhiên, do vẫn nằm trong giới hạn cho phép, phương án này được xem là phù hợp với mục tiêu nâng cao năng suất, nhất là trong các ứng dụng mà hiệu quả sản xuất được ưu tiên hơn độ bền điện cực.

Vai trò của phương án “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi”.

Phương án này đóng vai trò là phương án định hướng doanh nghiệp, thể hiện kịch bản vận hành đạt năng suất cao nhất trong điều kiện chấp nhận được về chất lượng và mòn điện cực. Trong các mục tiếp theo, phương án này sẽ được so sánh trực tiếp với nghiệm *knee* và các phương án được lựa chọn bởi *AHP*, *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS* nhằm đánh giá toàn diện ưu – nhược điểm của từng chiến lược ra quyết định, từ đó đưa ra lựa chọn cuối cùng cho ứng dụng thực tế.

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

Sau khi xác định các phương án đại diện từ tập nghiệm *Pareto* bằng các chiến lược khác nhau, bao gồm nghiệm *knee*, phương án tối ưu theo *AHP*, các phương án được lựa chọn bởi *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS*, cũng như phương án *MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi, việc so sánh tổng hợp là cần thiết nhằm lựa chọn chế độ gia công tối ưu phù hợp nhất cho ứng dụng thực tế. Bảng 4.4 trình bày các thông số đầu vào và đầu ra tương ứng của tất cả các phương án đại diện này.

Từ Bảng 4.4 có thể nhận thấy rằng phương án tối ưu theo *AHP* cho giá trị *MRR* cao nhất trong số các phương án được xét. Tuy nhiên, phương án này không thuộc tập nghiệm khả thi do giá trị độ nhám bề mặt *Ra* vượt quá giới hạn cho phép của doanh nghiệp. Điều này phản ánh rõ đặc trưng của *AHP* khi tiêu chí năng suất được gán trọng số lớn, dẫn đến xu hướng lựa chọn các nghiệm có *MRR* rất cao nhưng chưa chắc đáp ứng đầy đủ các ràng buộc công nghệ.

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>	<i>T_{on}</i>	<i>T_{off}</i>	<i>I_p</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	✓

Nghiệm *knee* trên *Pareto front* đóng vai trò là mốc tham chiếu kỹ thuật, thể hiện vùng đánh đổi hiệu quả giữa các mục tiêu xung đột. Nghiệm này thuộc tập

nghiệm khả thi và đạt sự cân bằng tốt giữa MRR , Ra và HWR , tuy nhiên không tối ưu theo tiêu chí năng suất, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu doanh nghiệp ưu tiên MRR .

Ngược lại, các phương án được lựa chọn bởi $TOPSIS$, $EAMR$ và $EDAS$ cho kết quả hoàn toàn đồng thuận, phản ánh tính ổn định cao của quyết định khi sử dụng các phương pháp $MCDM$ dựa trên trọng số $Entropy$. Các phương án này đều thuộc tập nghiệm khả thi, có ưu điểm nổi bật là Ra và HWR thấp, giúp đảm bảo chất lượng bề mặt và tuổi thọ điện cực. Tuy nhiên, MRR đạt được ở mức trung bình so với các nghiệm khả thi khác, do triết lý lựa chọn của các phương pháp này hướng tới sự cân bằng giữa các tiêu chí hơn là tối đa hóa năng suất.

Đáng chú ý, phương án MRR lớn nhất trong tập nghiệm khả thi trực tiếp đáp ứng yêu cầu của doanh nghiệp, khi đạt năng suất gia công cao nhất trong số các nghiệm thỏa các ràng buộc công nghệ. Mặc dù phương án này nằm gần biên ràng buộc, đặc biệt đối với chỉ tiêu HWR , nhưng vẫn đảm bảo tính khả thi và cho thấy hiệu quả vượt trội về mặt năng suất so với các phương án $MCDM$ cân bằng.

Trên cơ sở so sánh toàn diện, có thể rút ra kết luận rằng: 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, khi doanh nghiệp ưu tiên năng suất gia công trong giới hạn chất lượng cho phép.

Do đó, trong khuôn khổ nghiên cứu này, phương án “ MRR lớn nhất trong tập nghiệm khả thi” được đề xuất là chế độ gia công tối ưu cuối cùng, còn các phương án khác được sử dụng như các mốc so sánh và tham chiếu nhằm làm rõ bản chất và đặc điểm của quá trình tối ưu đa mục tiêu.

Kết luận Chương 4

Trong Chương 4, bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình EDM có hỗ trợ rung động siêu âm đã được giải quyết một cách hệ thống thông qua sự kết hợp giữa mô hình dự đoán GPR , thuật toán tối ưu $NSGA-II$ và các chiến lược ra quyết định khác nhau. Cách tiếp cận này cho phép đồng thời xem xét các mục tiêu xung đột gồm tốc độ bóc vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và tốc độ mòn điện cực (HWR).

Kết quả tối ưu bằng $NSGA-II$ đã tạo ra một tập nghiệm $Pareto$ phản ánh đầy đủ mối quan hệ đánh đổi giữa ba mục tiêu. Việc phân tích $Pareto$ front và xác định nghiệm $knee$ giúp làm rõ cấu trúc của không gian nghiệm, đồng thời cung cấp mốc tham chiếu kỹ thuật cho các bước ra quyết định tiếp theo. Tuy nhiên, nghiệm $knee$

không nhất thiết là phương án tối ưu cuối cùng khi xét đến yêu cầu thực tế của doanh nghiệp.

Trên cơ sở tập nghiệm *Pareto*, các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí gồm *AHP*, *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS* đã được áp dụng để lựa chọn phương án đại diện theo các triết lý khác nhau. Kết quả cho thấy phương án *AHP* có xu hướng tối đa hóa năng suất nhưng có thể vi phạm ràng buộc về chất lượng bề mặt, trong khi *TOPSIS*, *EAMR* và *EDAS* cho kết quả đồng thuận, ổn định và đảm bảo tốt các ràng buộc công nghệ, nhưng đạt *MRR* ở mức trung bình.

Đặc biệt, nghiên cứu đã đề xuất và áp dụng thêm một chiến lược lựa chọn định hướng doanh nghiệp, được gọi là “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi”, trong đó *MRR* được tối đa hóa dưới các ràng buộc $Ra \leq 4 \mu\text{m}$ và $HWR \leq 0,6 \text{ mm/h}$. Kết quả cho thấy phương án này đạt năng suất gia công cao nhất trong số các nghiệm có thể chấp nhận về mặt kỹ thuật, đồng thời phản ánh sát thực tế yêu cầu sản xuất.

Từ các phân tích so sánh tổng hợp, có thể kết luận rằng không tồn tại một phương án tối ưu duy nhất cho mọi mục tiêu, mà việc lựa chọn phụ thuộc vào định hướng ứng dụng cụ thể. Trong bối cảnh doanh nghiệp ưu tiên năng suất, phương án “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi” được đề xuất là chế độ gia công tối ưu cuối cùng cho triển khai thực tế, trong khi các phương án khác (*knee*, *MCDM*) đóng vai trò tham chiếu và hỗ trợ ra quyết định.

Nhìn chung, Chương 4 đã chứng minh tính hiệu quả của cách tiếp cận tối ưu đa mục tiêu kết hợp ra quyết định dưới ràng buộc, đồng thời cung cấp một khung phương pháp có thể mở rộng cho các bài toán tối ưu quá trình gia công khác trong lĩnh vực sản xuất tiên tiến.

KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án đã thực hiện nghiên cứu có hệ thống về gia công bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi bằng gia công xung điện có trợ giúp rung động siêu âm (*UV-EDM*) với điện cực graphite HK2. Trên cơ sở thiết kế thí nghiệm *Box-Behnken* cho 5 thông số công nghệ đầu vào ($A, T_{on}, T_{off}, I_p, SV$) và 3 chỉ tiêu đầu ra (MRR, Ra, HWR), luận án đã xây dựng mô hình dự đoán, phân tích ảnh hưởng thông số và đề xuất các chế độ gia công tối ưu theo định hướng kỹ thuật và yêu cầu thực tế sản xuất. Các kết luận chính như sau:

1. **Về hệ thống thực nghiệm và dữ liệu:** Luận án đã thiết kế và vận hành thành công hệ thống *UV-EDM* trên máy *Sodick*, tích hợp bộ rung siêu âm và *horn* truyền rung vào chi tiết, phù hợp với điều kiện sử dụng điện cực graphite (giòn, khó truyền rung). Dữ liệu thực nghiệm được thu thập có tính lặp và đủ bao phủ miền khảo sát, tạo nền tảng tin cậy cho mô hình hóa và tối ưu hóa.
2. **Về mô hình hóa:** Luận án đã xây dựng các mô hình hồi quy và đặc biệt cải thiện độ chính xác dự đoán bằng mô hình *Gaussian Process Regression (GPR)* cho cả ba đại lượng MRR, Ra, HWR . Kết quả cho thấy *GPR* phù hợp tốt với tính phi tuyến và nhiễu của quá trình *UV-EDM*, đặc biệt khi dữ liệu đầu ra được xử lý bằng biến đổi *Box-Cox* nhằm cải thiện phân phối và ổn định phương sai. Nhờ đó, mô hình *GPR* có thể sử dụng như mô hình thay thế (*surrogate*) hiệu quả cho bài toán tối ưu.
3. **Về tối ưu hóa đơn mục tiêu:** Luận án đã giải ba bài toán tối ưu đơn mục tiêu dựa trên mô hình *GPR*, gồm (i) cực đại hóa MRR , (ii) cực tiểu hóa Ra và (iii) cực tiểu hóa HWR . Các nghiệm tối ưu đơn mục tiêu giúp xác định rõ biên năng lực công nghệ của hệ thống và làm nổi bật bản chất đánh đổi giữa năng suất – chất lượng bề mặt – mòn điện cực, đồng thời cung cấp nghiệm tham chiếu quan trọng cho tối ưu đa mục tiêu.
4. **Về tối ưu hóa đa mục tiêu 3 tiêu chí ($MRR-Ra-HWR$):** Luận án đã giải trực tiếp bài toán tối ưu đa mục tiêu với đồng thời ba mục tiêu: tối đa hóa MRR , tối thiểu hóa Ra và tối thiểu hóa HWR bằng thuật toán *NSGA-II* (thông qua *gamultiobj*) kết hợp mô hình *GPR*, thu được tập nghiệm *Pareto* ba chiều. Kết quả phân tích *Pareto* và nghiệm *knee* cho thấy cấu trúc đánh đổi rõ rệt: tăng MRR thường kéo theo Ra và/hoặc HWR tăng, do đó cần chiến lược ra quyết định để chọn một nghiệm đại diện phục vụ triển khai.

5. **Về lựa chọn phương án và định hướng doanh nghiệp:** Từ tập nghiệm *Pareto*, luận án đã áp dụng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (*AHP*, *TOPSIS*, *EAMR*, *EDAS*; trọng số *Entropy* cho *TOPSIS/EAMR/EDAS*) và đồng thời đề xuất chiến lược lựa chọn theo yêu cầu sản xuất là “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi”. Với ràng buộc doanh nghiệp $Ra \leq 4 \mu\text{m}$ và $HWR \leq 0,6 \text{ mm/h}$, chiến lược này cho phép chọn nghiệm có năng suất cao nhất trong phạm vi chấp nhận được về chất lượng và mòn điện cực. Kết quả so sánh cho thấy *AHP* có thể cho nghiệm *MRR* cao nhưng không nhất thiết là nghiệm khả thi; trong khi *TOPSIS/EAMR/EDAS* cho nghiệm ổn định và đồng thuận; còn phương án “*MRR* lớn nhất trong tập nghiệm khả thi” phản ánh trực tiếp ưu tiên sản xuất và được đề xuất làm chế độ tối ưu cuối cùng khi mục tiêu doanh nghiệp đặt nặng năng suất.

Tổng thể, luận án đã hình thành một quy trình đầy đủ và khả thi gồm: thực nghiệm, xử lý dữ liệu, mô hình *GPR*, tối ưu *NSGA-II*, ra quyết định trên tập nghiệm *Pareto* (bao gồm chiến lược theo ràng buộc doanh nghiệp), có thể tái sử dụng cho các bài toán *UV-EDM* và các quá trình gia công tiên tiến tương tự.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

- Mở rộng đối tượng vật liệu và điều kiện công nghệ: áp dụng quy trình mô hình hóa-tối ưu cho các vật liệu khó gia công khác (hợp kim titan, thép khuôn khác, hợp kim chịu nhiệt...) và các điều kiện điện môi/điện cực khác nhằm đánh giá khả năng khái quát của mô hình *GPR* và chiến lược lựa chọn nghiệm khả thi.

- So sánh các dạng rung: Nghiên cứu hiệu quả khi rung siêu âm được truyền qua điện cực hoặc đồng thời qua cả hai phía (điện cực và phôi).

- Tích hợp mô phỏng vật lý: Kết hợp mô hình nhiệt, dòng điện, plasma và dòng chảy để giải thích bản chất vật lý của bóc tách vật liệu khi có rung siêu âm.

- Phát triển phần mềm hỗ trợ quyết định: Xây dựng giao diện tương tác giúp người dùng nhập yêu cầu (ưu tiên *MRR/HWR*) và tự động đề xuất thông số công nghệ.

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.
6. Van Dinh T, Le QT, **Mai LT**, Vu PN, Tran GN. 2026, Statistical Modeling and Optimization of Ra and Mrr in Ultrasonic-Assisted of 90CrSi Steel Using Graphite Electrodes. *Journal of Machine Engineering*, 26(1), pp. 63-77.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Shabgard M, Kakolvand H, Seyedzavvar M, Shotorbani RM. 2011, Ultrasonic assisted EDM: Effect of the workpiece vibration in the machining characteristics of FW4 Welded Metal. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 6(4), pp. 419-428.
2. Santos I, Polli ML, Daniel H. 2015, Influence of input parameters on the electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *International Journal of Manufacturing Research*, 10(3), pp. 286-298.
3. Chhaniyara PN, Badola NP, Pandey AB, Sata A. 2014, A Review Paper on EDM and ECM of Stainless Steel. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2(4), pp. 3982-3984-3982-3984.
4. Barenji RV, Pourasl HH, Khojastehnezhad VM. 2016, Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: Prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio. *Precision Engineering*, 45(pp. 435-444.
5. Mascaraque-Ramirez C, Franco P. 2015, Numerical modelling of surface quality in EDM processes. *Procedia Engineering*, 132(pp. 671-678.
6. Torres A, Puertas I, Luis C. 2015, Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys. *Precision Engineering*, 40(pp. 33-45.
7. Puertas I, Luis C, Alvarez L. 2004, Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC-Co. *Journal of Materials Processing Technology*, 153(pp. 1026-1032.
8. Hasçalık A, Çaydaş U. 2007, Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Applied surface science*, 253(22), pp. 9007-9016.
9. Gopalakannan S, Senthilvelan T, Ranganathan S. 2012, Modeling and optimization of EDM process parameters on machining of Al 7075-B4C MMC using RSM. *Procedia Engineering*, 38(pp. 685-690.
10. Caiazzo F, Cuccaro L, Fierro I, Petrone G, Alfieri V. 2015, Electrical discharge machining of René 108 DS nickel superalloy for aerospace turbine blades. *Procedia CIRP*, 33(pp. 382-387.
11. Wang J, Han F, Zhao F. 2012, Improvement of EDM efficiency with a new adaptive control strategy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9), pp. 1025-1040.
12. Long BT, Phan NH, Cuong N, Jatti VS. 2016, Optimization of PMEDM process parameter for maximizing material removal rate by Taguchi's method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5), pp. 1929-1939.

13. Singh G, Lamichhane Y, Bhui AS, Sidhu SS, Bains PS, Mukhiya P. 2019, Surface morphology and microhardness behavior of 316L in HAp-PMEDM. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 17(3), pp. 445-454.
14. Prihandana GS, Mahardika M, Hamdi M, Mitsui K. 2011, Effect of low-frequency vibration on workpiece in EDM processes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(5), pp. 1231-1234.
15. Sabyrov N, Jahan M, Bilal A, Perveen A. 2019, Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining (edm)—An overview. *Materials*, 12(3), pp. 522.
16. Iwai M, Ninomiya S, Suzuki K. 2013, Improvement of EDM properties of PCD with electrode vibrated by ultrasonic transducer. *Procedia CIRP*, 6(pp. 146-150.
17. Endo T, Tsujimoto T, Mitsui K. 2008, Study of vibration-assisted micro-EDM—the effect of vibration on machining time and stability of discharge. *Precision Engineering*, 32(4), pp. 269-277.
18. Tong H, Li Y, Wang Y. 2008, Experimental research on vibration assisted EDM of micro-structures with non-circular cross-section. *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3), pp. 289-298.
19. Goigana M, Sarasua J, Ramos J. 2018, Ultrasonic assisted electrical discharge machining for high aspect ratio blind holes. *Procedia CIRP*, 68(pp. 81-85.
20. Huu PN, Tien LB, Duc QT, Van DP, Xuan CN, Van TN, et al., 2019, Multi-objective optimization of process parameter in EDM using low-frequency vibration of workpiece assigned for SKD61. *Sādhanā*, 44(10), pp. 211.
21. Liao Y, Liang H. 2016, Study of vibration assisted inclined feed micro-EDM drilling. *Procedia CIRP*, 42(pp. 552-556.
22. Abdullah A, Shabgard MR, Ivanov A, Shervanyi-Tabar MT. 2009, Effect of ultrasonic-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3), pp. 268-280.
23. Le Xuan Hung TTH, Pi VN. 2017, A study on modelling surface finish in electrical discharge machining tablet shape punches using response surface methodology. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 6(pp. 387-390.
24. Cuong NV, Ky LH, Hong TT, Hoang TT, Cuong NM, Tung LA, et al., 2020, Influence of process parameters on electrode wear in electrical discharge machining cylindrical shaped parts. *Key Engineering Materials*, 853(pp. 24-28.
25. Nguyen A-T, Le X-H, Nguyen V-T, Phan D-P, Tran Q-H, Nguyen D-N, et al., 2021, Optimizing main process parameters when conducting powder-mixed electrical discharge machining of hardened 90CrSi. *Machines*, 9(12), pp. 375.

26. Hong TT, Tam DT, Vinh DT, Tung LA, Quy LT, Muthuramalingam T, et al., editors. Optimization of PMEDM Parameters for Improving MMR in Machining 90CrSi Steel-A Taguchi Approach. International Conference on Engineering Research and Applications; 2020: Springer.
27. Tran T-H, Nguyen M-C, Luu A-T, Do T-V, Le T-Q, Vu T-T, et al., 2020, Electrical discharge machining with SiC powder-mixed dielectric: an effective application in the machining process of hardened 90CrSi steel. *Machines*, 8(3), pp. 36.
28. Nahak B, Gupta A. 2019, A review on optimization of machining performances and recent developments in electro discharge machining. *Manufacturing Review*, 6(pp. 2.
29. Jahan M. Nontraditional machining processes: research advances. 2013: Springer London, UK:. p.
30. Singh S, Maheshwari S, Pandey P. 2004, Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), pp. 272-277.
31. Qudeiri JEA, Zaiout A, Mourad A-HI, Abidi MH, Elkaseer A. 2020, Principles and characteristics of different EDM processes in machining tool and die steels. *Applied sciences*, 10(6), pp. 2082.
32. Wang C, Chu X, Lu Y, Li H, editors. Crack study of recasting layer on workpiece surface in Micro-EDM. MATEC Web of Conferences; 2022: EDP Sciences.
33. Zhao FL, Wang H, Lu Z. 2005, Calculating the overcut in electro-discharge machining. *Key Engineering Materials*, 291(pp. 561-566.
34. Kremer D, Lhiaubet C, Moisan A. 1991, A study of the effect of synchronizing ultrasonic vibrations with pulses in EDM. *CIRP annals*, 40(1), pp. 211-214.
35. Shervani-Tabar MT, Abdullah A, Shabgard MR. 2007, Numerical and experimental study on the effect of vibration of the tool in ultrasonic assisted EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(7), pp. 719-731.
36. Chen B, Tao M, Luo Z. 2024, Effect of ultrasonic assisted EDM based on horizontal vibration on deep and small hole machining. *Scientific Reports*, 14(1), pp. 28146.
37. Liu Y, Chang H, Zhang W, Ma F, Sha Z, Zhang S. 2018, A simulation study of debris removal process in ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining (EDM) of deep holes. *Micromachines*, 9(8), pp. 378.

38. Wang P, Hu J, Hu H, Yu D, Yin Z, Zou H, Lai T. 2025, Debris motion and taper suppression in EDM deep hole machining assisted by longitudinal/torsional ultrasonic vibration. *Journal of Manufacturing Processes*, 133(pp. 798-810).
39. Bui VD, Martin A, Berger T, Harnisch K, Döring J, Bertrand J, Schubert A. 2024, Ultrasonic Vibration assisted Silver Integration by Powder Mixed EDM for Antibacterial Surfaces. *Procedia CIRP*, 123(pp. 410-415).
40. Praneetpongung C, Fukuzawa Y, Nagasawa S, Yamashita K. 2010, Effects of the EDM combined ultrasonic vibration on the machining properties of Si₃N₄. *Materials Transactions*, 51(11), pp. 2113-2120.
41. Lei J, Shen H, Wu H, Pan W, Wu X, Zhao C. 2024, Ultrasonic vibration-assisted electrical discharge machining of enclosed microgrooves with laminated electrodes. *Journal of Materials Research and Technology*, 30(pp. 9521-9530).
42. Gao X, Li J, Xing Q, Zhang Q. 2022, Research on ultrasonic vibration–assisted electrical discharge machining SiCp/Al composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(3), pp. 2095-2113.
43. Shabgard MR, Gholipour A, Mohammadpourfard M. 2018, Numerical and experimental study of the effects of ultrasonic vibrations of tool on machining characteristics of EDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5), pp. 2657-2669.
44. Bui VD, Boehme V, Mwangi JW, Berger T, Schubert A. 2020, Investigation of ultrasonic vibration assisted powder mixed electrical discharge machining for antibacterial coating on implant surfaces. *Procedia CIRP*, 95(pp. 431-436).
45. Yin Z, Zhang P, Zhou P, Zhang K, Sun Q, Zhan Q, Li H. 2023, A novel EDM method using longitudinal-torsional ultrasonic vibration (LTV) electrodes to improve machining performance for micro-holes. *Journal of Manufacturing Processes*, 102(pp. 231-243).
46. Wang Y, Fan L, Shi J, Dong Y, Fu Z. 2023, Effect of cavitation on surface formation mechanism of ultrasonic vibration-assisted EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(10), pp. 3645-3656.
47. Li Z, Tang J, Bai J. 2020, A novel micro-EDM method to improve microhole machining performances using ultrasonic circular vibration (UCV) electrode. *International Journal of Mechanical Sciences*, 175(pp. 105574).
48. Li Z, Tang J, Li Y, Bai J. 2022, Investigation on surface integrity in novel micro-EDM with two-dimensional ultrasonic circular vibration (UCV) electrode. *Journal of Manufacturing Processes*, 76(pp. 828-840).

49. Hou S, Bai J, Liu H, Zhou Z, Lu Z. 2023, Study on material erosion mechanism of ultrasonic vibration-assisted micro-EDM based on heat-flow coupling analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(1), pp. 465-478.
50. Singh P, Yadava V, Narayan A. 2018, Parametric study of ultrasonic-assisted hole sinking micro-EDM of titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5), pp. 2551-2562.
51. Sundaram MM, Pavalarajan GB, Rajurkar KP. 2008, A study on process parameters of ultrasonic assisted micro EDM based on Taguchi method. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(2), pp. 210-215.
52. Ichikawa T, Natsu W. 2013, Realization of micro-EDM under ultra-small discharge energy by applying ultrasonic vibration to machining fluid. *Procedia CIRP*, 6(pp. 326-331.
53. Shervani-Tabar MT, Maghsoudi K, Shabgard MR. 2013, Effects of simultaneous ultrasonic vibration of the tool and the workpiece in ultrasonic assisted EDM. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 14(1), pp. 1-9.
54. Xing Q, Yao Z, Zhang Q. 2021, Effects of processing parameters on processing performances of ultrasonic vibration-assisted micro-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(1), pp. 71-86.
55. Han J, Gao X, Zhou Y, Li Z, Gao M, Zhang Q. 2024, Machining characteristics in ultrasonic vibration-assisted powder-mixed electrical discharge machining of TiN ceramics. *Ceramics International*, 50(8), pp. 13478-13489.
56. Dong Y, Liu Q, Wang Y, Zhang S, Wang W, Zhou W, Shi S. 2024, Study on mechanism and surface topography of ultrasonic powder mixing–assisted EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135(1), pp. 337-350.
57. Xu M, Zhang J, Li Y, Zhang Q, Ren S. 2009, Material removal mechanisms of cemented carbides machined by ultrasonic vibration assisted EDM in gas medium. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(4), pp. 1742-1746.
58. Gholipoor A, Shabgard MR, Mohammadpourfard M, Abbasi H. 2020, Comparative study of ultrasonic vibrations assisted EDM and magnetic field assisted EDM processes. *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, 21(1), pp. 45-64.
59. Lin Y-C, Chuang F-P, Wang A-C, Chow H-M. 2014, Machining characteristics of hybrid EDM with ultrasonic vibration and assisted magnetic force.

International journal of precision engineering and manufacturing, 15(6), pp. 1143-1149.

60. Xu J, Xia S, Yu P, Li M. 2024, Multi-objective parameter optimization of ultrasonic vibration–assisted micro-EDM of Ti-6Al-4V alloys. *Journal of Vibration and Control*, 30(7-8), pp. 1818-1828.
61. Zhang P, Yin Z, Yu M, Tao D, Yu D, Zhang Q, Li H. 2024, Investigating mechanisms of debris removal in ultrasonic vibration-assisted EDM drilling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 279(pp. 109486.
62. CHENXUE W, SASAKI T, HIRAO A. 2022, Observation of bubble behavior in EDM with ultrasonic vibration. *Procedia CIRP*, 113(pp. 267-272.
63. Wang C, Sasaki T, Hirao A. 2023, In situ observation of bubbles and the effect of ultrasonic vibration on bubble behavior in EDM. *Materials*, 16(20), pp. 6676.
64. Lin Y-C, Hung J-C, Chow H-M, Wang A-C, Chen J-T. 2016, Machining characteristics of a hybrid process of EDM in gas combined with ultrasonic vibration and AJM. *Procedia CIRP*, 42(pp. 167-172.
65. Rajeswari R, Shunmugam M. 2020, Finishing performance of die-sinking EDM with ultrasonic vibration and powder addition through pulse train studies. *Machining Science and Technology*, 24(2), pp. 245-273.
66. Wang Y, Liu Z, Shi J, Dong Y, Yang S, Zhang X, Lin B. 2020, Analysis of material removal and surface generation mechanism of ultrasonic vibration–assisted EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(1), pp. 177-189.
67. Singh G, Satsangi P, Prajapati D. 2020, Effect of rotating magnetic field and ultrasonic vibration on micro-EDM process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(2), pp. 1059-1070.
68. Hirao A, Gotoh H, Tani T. 2018, Some effects on EDM characteristics by assisted ultrasonic vibration of the tool electrode. *Procedia CIRP*, 68(pp. 76-80.
69. Zhang P, Yin Z, Dai C, Cao Z, Miao Q, Zhang K. 2022, The effect of ultrasonic amplitude on the performance of ultrasonic vibration-assisted EDM micro-hole machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(3), pp. 1513-1524.
70. Zhang Y, Xie B. 2021, Investigation on hole diameter non-uniformity of hole arrays by ultrasonic vibration-assisted EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(11), pp. 3083-3091.
71. Prihandana GS, Mahardika M, Hamdi M, Wong YS, Mitsui K. 2009, Effect of micro-powder suspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-

EDM processes—Taguchi approach. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12-13), pp. 1035-1041.

72. Jafferson J, Hariharan P, Ram Kumar J. 2014, Effects of ultrasonic vibration and magnetic field in micro-EDM milling of nonmagnetic material. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(3), pp. 357-363.

73. Đức NV. 2020, Nghiên cứu xác định chế độ công nghệ tối ưu khi gia công xung tia lửa điện bằng điện cực đồng. *Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*, pp.

74. Van Thanh D, Tuyen VT, Dung NTQ, Binh VD, Thao LTP. 2025, Application of MABAC, MOORA, MAIRCA and Entropy Methods in Multi-Criteria Decision Making for EDM of 90CrSi Using Graphite Electrodes. *International Journal of Mechanics*, 19(pp. 20-29.

75. Long BT, Cường N, Phần NH, Minh NV. 2015, Effects of Titanium powder mixed in dielectric fluid on SKD61 steel surface quality in electrical discharge machining. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ-Đại học Đà Nẵng*, pp. 53-57.

76. Nguyễn MC. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến quá trình gia công tia lửa điện bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi với dung dịch điện môi trộn bột nano SiC: Viện Nghiên cứu Cơ khí; 2023.

77. Hoang XT, Vu NP, Le TQ, editors. Effect of SiC Powder in PMEDM Process on Electrode Wear When Machining Cylindrical-Shaped Part by SKD11 Hardened Steel. *International Conference on Engineering Research and Applications; 2023: Springer.*

78. Le QD, Nguyen HP, Banh TL, Nguyen DT. 2020, Effect of low-frequency vibrations on MRR, EWR and R a in powder-mixed electrical discharge machining. *International Journal of Modern Physics B*, 34(22n24), pp. 2040153.

79. Dinh V-T, Do T-T, Le T-Q, Luu A-T, Vu N-P, Tran T-P-T. 2025, Initial Research on Ultrasonic Vibration-Assisted EDM for Processing Cylindrical Surfaces. *Coatings*, 15(4), pp. 463.

80. Li M, Zhang T, Fu L, Ding L, Xie L. 2025, Research on the strengthening layer of TC4 alloy strengthened by ultrasonic vibration-assisted powder-mixed near-dry multi-dielectrics EDM. *Journal of Mechanical Science and Technology*, pp. 1-8.

81. Mercer J. 2014, Graphite vs. copper. *Europe*, 50(pp. 25.

82. STRAKA L, DITTRICH G. 2019, INFLUENCE OF GRAPHITE TOOL ELECTRODE SHAPE ON TWR AND MRR AT EDM. *MM Science Journal*, pp.

83. Abdullah A, Shabgard MR. 2008, Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co). *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38(11), pp. 1137-1147.

84. Xing Q, Gao M, Yao Z, Zhang Q. 2023, Research on ultrasonic vibration-assisted micro-EDM milling of microgrooves with large aspect ratio. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(3), pp. 1629-1639.

85. Zhixin J, Jianhua Z, Xing A. 1995, Ultrasonic vibration pulse electro-discharge machining of holes in engineering ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 53(3-4), pp. 811-816.

86. Williams CK, Rasmussen CE. Gaussian processes for machine learning: MIT press Cambridge, MA; 2006.

87. Zhang P, Yin Z, Yu D, Shen X, Wang Y, Dai C, Zhang K. 2023, Experimental research and multi-objective optimization of ultrasonic vibration-assisted EDM for Ti6Al4V micro-holes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(7), pp. 3413-3425.

88. Singh J, Walia R, Satsangi P, Singh V. 2011, FEM modeling of ultrasonic vibration assisted work-piece in EDM process. *International Journal of Mechanic Systems Engineering*, 1(1), pp. 8-16.

89. Choubey M, Maity K, Sharma A. 2020, Finite element modeling of material removal rate in micro-EDM process with and without ultrasonic vibration. *Grey Systems: Theory and Application*, 10(3), pp. 311-319.

90. Shabgard M, Badamchizadeh M, Ranjbary G, Amini K. 2013, Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), pp. 32-39.

91. Box GE, Cox DR. 1964, An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 26(2), pp. 211-243.

92. Hwang C-L, Lai Y-J, Liu T-Y. 1993, A new approach for multiple objective decision making. *Computers & operations research*, 20(8), pp. 889-899.

93. Amiri M, Antucheviciene J. 2016, Evaluation by an area-based method of ranking interval type-2 fuzzy sets (EAMRIT-2F) for multi-criteria group decision-making. *Transformations in Business and Economics*, 15(3), pp. 76-95.

94. Alinezhad A, Khalili J. New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM): Springer; 2019.

95. Hieu TT, Thao NX, Thuy L. 2019, Application of MOORA and COPRAS models to select materials for mushroom cultivation. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, 17(4), pp. 32-2331.