

BỘ CÔNG THƯƠNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

**NARIME**

NGUYỄN THÁI SƠN

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ  
CÔNG NGHỆ ĐẾN CHẤT LƯỢNG CHI TIẾT IN 3D -  
SLM TỪ VẬT LIỆU Ti6Al4V

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ

HÀ NỘI - 2026

BỘ CÔNG THƯƠNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

**NARIME**

NGUYỄN THÁI SƠN

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ  
CÔNG NGHỆ ĐẾN CHẤT LƯỢNG CHI TIẾT IN 3D -  
SLM TỪ VẬT LIỆU Ti6Al4V**

**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**

**PGS.TS. Trần Ngọc Hiền**

**PGS.TS. Nguyễn Chí Sáng**

**HÀ NỘI - 2026**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả trình bày trong Luận án này là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất cứ công trình nào khác.

*Hà Nội, ngày tháng năm 2026*

Nghiên cứu sinh

**Nguyễn Thái Sơn**

**LỜI CẢM ƠN**

Nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn **PGS.TS. Trần Ngọc Hiền và PGS.TS. Nguyễn Chí Sáng** đã tận tình hướng dẫn, tạo điều kiện, động viên trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án. Tôi xin trân trọng cảm ơn Viện Nghiên cứu Cơ khí, lãnh đạo, chuyên viên cùng các Thầy của Trung tâm đào tạo của Viện, đã tạo điều kiện thuận lợi, giúp đỡ tôi trong quá trình học tập, nghiên cứu thực hiện luận án. Tôi xin trân trọng cảm ơn Ban giám hiệu, Trung tâm Khoa học công nghệ, Khoa Cơ khí - trường Đại học Giao thông Vận tải đã hỗ trợ kinh phí và tạo điều kiện về thời gian trong quá trình học tập và nghiên cứu. Tôi xin trân trọng cảm ơn TS. Đoàn Nhật Minh đã giúp đỡ tôi về mặt tinh thần khi bắt đầu luận án. Tôi xin trân trọng cảm ơn các thầy, cô, các đồng nghiệp đã đóng góp ý kiến, hỗ trợ tôi trong quá trình học tập, nghiên cứu thực hiện luận án. Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành tới toàn thể gia đình, bạn bè, những người đã luôn chia sẻ, động viên, giúp đỡ tôi học tập, nghiên cứu và hoàn thành Luận án này.

*Hà Nội, ngày tháng năm 2026*

Nghiên cứu sinh

**Nguyễn Thái Sơn**

## MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	ii
LỜI CẢM ƠN.....	iii
MỤC LỤC.....	iv
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT.....	viii
CÁC KÝ HIỆU TRONG MÔ HÌNH TOÁN .....	x
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	xii
DANH MỤC CÁC HÌNH VÀ ĐỒ THỊ.....	xiv
MỞ ĐẦU.....	1
1. Tính cấp thiết của đề tài luận án.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án .....	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	2
4. Phương pháp nghiên cứu.....	3
a. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết.....	3
b. Phương pháp nghiên cứu mô phỏng .....	4
c. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm.....	4
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....	4
a. Ý nghĩa khoa học.....	4
b. Ý nghĩa thực tiễn.....	5
6. Các đóng góp mới của luận án .....	5
7. Bố cục của luận án .....	5
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ SẢN XUẤT BỒI ĐẮP VÀ PHƯƠNG PHÁP IN SLM VỚI VẬT LIỆU Ti6Al4V .....	6
1.1. Tổng quan về sản xuất bồi đắp.....	7
1.2. Tình hình nghiên cứu ngoài nước .....	12
1.2.1. Tình hình nghiên cứu về sản xuất bồi đắp.....	12
1.2.2. Tình hình nghiên cứu về in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc với vật liệu Ti6Al4V .....	17
1.3. Tình hình nghiên cứu trong nước.....	20

1.3.1. Tình hình nghiên cứu về sản xuất bồi đắp.....	20
1.3.2. Tình hình nghiên cứu về in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc với vật liệu Ti6Al4V .....	24
1.4. Chất lượng sản phẩm trong sản xuất bồi đắp.....	25
1.5. Phương pháp in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc.....	26
1.6 Đề xuất các thông số nghiên cứu trong luận án .....	28
1.7 Nhiệm vụ nghiên cứu của đề tài luận án .....	28
KẾT LUẬN CHƯƠNG 1.....	29
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT QUÁ TRÌNH IN 3D KIM LOẠI BẰNG PHƯƠNG PHÁP IN SLM.....	30
2.1. Chất lượng sản phẩm in .....	30
2.1.1. Độ chính xác về hình dạng .....	31
2.1.2. Chất lượng bề mặt.....	36
2.1.3. Tính chất cơ học.....	37
2.2. Mô hình chuyển pha của vật liệu kim loại khi in.....	37
2.3. Mô hình truyền nhiệt khi in SLM .....	40
2.4. Cơ chế in SLM .....	43
2.4.1. Quá trình in 1 lớp.....	46
2.4.2. Quá trình in nhiều lớp.....	47
2.5. Các thông số chế độ in ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm.....	49
2.6. Phương pháp mô phỏng khảo sát các thông số chế độ in .....	50
2.7. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm $2^k$ .....	51
2.7.1. Quy hoạch thực nghiệm.....	51
2.7.2. Quy hoạch thực nghiệm nhân tố toàn phần $2^k$ .....	52
2.7.2.1. Biểu diễn mô hình hồi quy theo dạng tuyến tính .....	54
2.7.2.2. Biểu diễn mô hình hồi quy theo hàm mũ .....	55
2.7.3. Điểm trung tâm trong quy hoạch thực nghiệm $2^k$ .....	56
KẾT LUẬN CHƯƠNG 2.....	57
CHƯƠNG 3: HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	58
3.1. Hệ thống thiết bị được sử dụng trong nghiên cứu.....	58

3.1.1. Máy in 3D SLM.....	59
3.1.2. Máy cắt dây EDM.....	61
3.1.3. Máy sấy bột trước khi in.....	61
3.1.4. Máy xử lý sau in (ủ nhiệt).....	62
3.1.5. Vật liệu thí nghiệm - Bột in Ti6Al4V.....	63
3.1.6. Mẫu thí nghiệm.....	64
3.2. Thiết bị đánh giá chất lượng sản phẩm in.....	65
3.2.1. Các thiết bị và phần mềm sử dụng trong đánh giá độ chính xác hình học ...	65
3.2.1.1. Độ thẳng, độ tròn và độ nhám .....	65
3.2.1.2. Độ chính xác kích thước, hình dạng hình học.....	65
3.2.1.3. Phần mềm sử dụng trong quét 3D .....	67
3.2.2. Thiết bị đánh giá tính chất cơ học của mẫu in.....	69
3.2.3. Thiết bị đo.....	69
3.2.3.1. Máy scan 3D.....	69
3.2.3.2. Máy kiểm tra độ nhám.....	70
3.2.3.3. Máy kiểm tra cấu trúc tế vi.....	71
3.2.3.4 Nguyên lý đo tổ chức tế vi của thiết bị FESEM S4800 HITACHI.....	72
3.3. Phương pháp nghiên cứu.....	72
3.3.1. Phương pháp mô phỏng .....	72
3.3.2 Phương pháp thực nghiệm .....	77
KẾT LUẬN CHƯƠNG 3.....	79
CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN CÁC CHỈ TIÊU CHẤT LƯỢNG KHI IN SLM.....	80
4.1. Đặt vấn đề .....	80
4.2. Thí nghiệm .....	80
4.2.1. Mục tiêu thí nghiệm.....	80
4.2.2. Thiết kế thí nghiệm.....	81
4.2.3. Tiến hành thí nghiệm .....	81
4.2.3.1. In các mẫu 9.....	81
4.2.3.2. Các bước xác định độ sai lệch hình dạng .....	82

4.2.3.3. Các bước đo độ nhám.....	84
4.2.3.4. Các bước đo cấu trúc tế vi.....	87
4.3. Kết quả và bàn luận.....	88
4.3.1. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới sai lệch hình dạng.....	88
4.3.2. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in đến độ nhám bề mặt.....	96
4.3.3. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới độ xốp.....	109
4.4. Chế độ công nghệ in tối ưu.....	116
4.4.1. Chế độ công nghệ in tối ưu với đơn mục tiêu về chất lượng.....	116
4.4.2. Chế độ công nghệ in tối ưu với đa mục tiêu về chất lượng.....	119
KẾT LUẬN CHƯƠNG 4.....	122
KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO.....	124
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ	
TÀI LIỆU THAM KHẢO	
PHỤ LỤC	

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
AI	Artificial Intelligence	Trí tuệ nhân tạo
AM	Additive Manufacturing	Công nghệ sản xuất bồi đắp (In 3D)
ASTM	American Society for Testing and Materials	Hiệp hội Vật liệu và Kiểm tra Hoa Kỳ
BJ	Binder Jetting	Phương pháp phun chất kết dính
CAD	Computer Aided Design	Thiết kế có sự trợ giúp của máy tính
CAE	Computer Aided Engineering	Kỹ thuật hỗ trợ bằng máy tính
CAM	Computer Aided Manufacturing	Sản xuất có sự trợ giúp của máy tính
CMM	Coordinate Measuring Machine	Máy đo tọa độ
CNC	Computer Numerical Control	Máy gia công điều khiển số bằng máy tính
DED	Directed Energy Deposition	Công nghệ bồi đắp năng lượng trực tiếp
DLP	Digital Light Processing	Phương pháp in xử lý ánh sáng kỹ thuật số
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Công nghệ thiêu kết laser trực tiếp
DOE	Design of Experiment	Thiết kế thí nghiệm
EBM	Electron Beam Melting	Công nghệ nóng chảy bằng chùm tia điện tử
EDM	Electrical Discharge Machining	Gia công tia lửa điện
FDM	Fused Deposition Modeling	Phương pháp đùn nóng chảy
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope	Kính hiển vi điện tử phát xạ trường
FFF	Fused Filament Fabrication	Công nghệ chế tạo sợi nóng chảy
HAZ	Heat affected zone	Vùng ảnh hưởng nhiệt
HTEZ	Heat treatment effect zone	Vùng biến đổi/ảnh hưởng do nhiệt
IS	Inherent Strains	Biến dạng nội tại
ISO	International Organization for Standardization	Tổ chức tiêu chuẩn hóa quốc tế
IGS	Initial Graphics Exchange Specification	Định dạng tệp mô hình CAD 3D
IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
LCD	Liquid Crystal Display	Công nghệ chiếu sáng bằng màn hình tinh thể lỏng

LMD	Laser Metal Deposition	Lắng đọng kim loại bằng laser
ME	Material Extrusion	Phương pháp ép đùn vật liệu
MJ	Material Jetting	Phương pháp phun vật liệu
MJF	Multi Jet Fusion	Công nghệ in đa tia
PBF	Powder Bed Fusion	Công nghệ tổng hợp lớp bột
QA	Quality Assurance	Đảm bảo chất lượng
SLA	Stereolithography Apparatus	Công nghệ chế tạo mẫu nhanh bằng chiếu sáng laser
SLM	Selective Laser Melting	Nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc
SLS	Selective Laser Sintering	Thiêu kết bằng laser có chọn lọc
STL	Stereolithography File Format	Định dạng tệp mô hình CAD 3D
TG	Temperature Gradient	Ảnh hưởng của nhiệt độ
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing	Sản xuất bồi đắp hồ quang dây
WIPS	Worldwide Intellectual Property Search	Tra cứu sở hữu trí tuệ toàn cầu

## CÁC KÝ HIỆU TRONG MÔ HÌNH TOÁN

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị (Thứ nguyên)
a, b	Kích thước elip theo trục y, z	(m)
C	Nhiệt dung riêng	(J/kg.K)
Cf, Cr	Chiều dài phía trước và phía sau elip theo trục x	(m)
d	Độ dày vùng ảnh hưởng nhiệt của lớp in sau lên lớp in trước	(mm)
d'	Đường kính hạt	( $\mu\text{m}$ )
D	Độ sai lệch hình dạng	(mm)
E	Mô đun đàn hồi	(Pa)
f	Lực bên trong (lực trên một đơn vị thể tích)	(N/m <sup>3</sup> )
ff, fr	Hệ số nguồn nhiệt ở phía trước và phía sau elip	
h	Chiều dày lớp in	(m)
h <sub>a</sub>	Khoảng cách	(m)
hc	Hệ số đối lưu	(W/m <sup>2</sup> .K)
hr	Hệ số truyền nhiệt bức xạ	(W/m <sup>2</sup> .K)
I	Cường độ dòng điện	(A)
k	Hệ số dẫn nhiệt	(W/m.K)
K	Độ lệch của giá trị đo so với giá trị đo trung bình	
m	Tham số mạng tinh thể	mm
p	Áp suất	N/m <sup>2</sup>
P	Độ xốp	(%)
P'	Độ xốp được tính toán	(%)
q	Vectơ thông lượng nhiệt	(W/m <sup>2</sup> )
Q <sub>nguồn nhiệt</sub>	Năng lượng laser phân bố cho vùng cần in của lớp in	(W/m <sup>3</sup> )
R <sub>a</sub>	Độ nhám bề mặt (1D)	( $\mu\text{m}$ )
RES	Độ lệch giữa giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán	
s	Quãng đường dịch chuyển	(m)
S <sub>a</sub>	Độ nhám bề mặt (2D)	( $\mu\text{m}$ )

SSre	Bình phương của độ lệch.	
t	Độ dày lớp in	(mm)
t'	Thời gian tương tác laser	(s)
T	Nhiệt độ	Kelvin (K) hoặc độ C (°C)
U	Nguồn Laser từ máy	(W)
V	Vận tốc in	(mm/s)
W <sub>x</sub> , W <sub>y</sub> , W <sub>z</sub>	Các đại lượng ảnh hưởng nhiệt	(J/m <sup>3</sup> )
x, y, z	Tọa độ trong không gian 3D	(m)
x <sub>0</sub> , y <sub>0</sub>	Tọa độ ban đầu trong không gian	(m)
α	Hệ số giãn nở nhiệt	(1/K)
θ	Góc	(rad)
λ	Hệ số dẫn nhiệt	Kelvin (W/m.K)
γ	Hệ số khuếch tán nhiệt	(J/(m.s.K))
ε	Biến dạng	
μ	Hệ số ma sát hoặc độ nhớt	
ν	Hệ số Poisson	
ξ, K	Hệ số nhiệt năng	(m/J)
ρ	Khối lượng riêng	(kg/m <sup>3</sup> )

## DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2.1. Các phương pháp xác định độ sai lệch hình dạng và ứng dụng của chúng .....	31
Bảng 2.2. Bộ thông số in trong một số nghiên cứu trong công nghệ in SLM.....	50
Bảng 2.3. TNT với 3 nhân tố dạng mã hóa .....	53
Bảng 3.1. Các thông số kỹ thuật của máy in 3D như sau:.....	60
Bảng 3.2. Các thông số kỹ thuật của máy cắt dây.....	61
Bảng 3.3. Các thông số kỹ thuật của máy sấy bột như sau .....	62
Bảng 3.4. Các thông số kỹ thuật của máy ủ nhiệt chân không .....	62
Bảng 3.5. Các thông số vật liệu bột Ti6Al4V.....	64
Bảng 3.6. Một số máy theo phương pháp đo tiếp xúc .....	66
Bảng 3.7. Một số máy theo phương pháp đo không tiếp xúc .....	67
Bảng 3.8. Các thông số kỹ thuật của máy Scan 3D Handy Silver .....	70
Bảng 3.9. Các thông số kỹ thuật của máy Zygo Zegage Pro HR.....	70
Bảng 3.10. Các thông số kỹ thuật của máy FESEM S4800 HITACHI.....	71
Bảng 3.11. Giá trị của các thông số mô phỏng .....	73
Bảng 3.12. Giá trị nhiệt độ tại vùng nóng chảy ( $T_m$ ) với mô hình Gauss.....	76
Bảng 3.13. Thực nghiệm toàn phần với 3 nhân tố dạng mã hóa .....	78
Bảng 4.1. Bộ thông số công nghệ in SLM.....	81
Bảng 4.2. Kết quả in các mẫu trên máy in FF-M180D .....	81
Bảng 4.3. Kết quả đo độ sai lệch hình dạng.....	83
Bảng 4.4. Kết quả đo độ nhám.....	85
Bảng 4.5. Kết quả đo $S_a$ , $S_q$ , $S_z$ , và $R_a$ .....	86
Bảng 4.6. Kết quả kiểm tra đặc điểm cấu trúc tế vi của các mẫu in.....	88
Bảng 4.7. Kết quả đo độ sai lệch hình dạng lớn nhất của các mẫu in .....	88
Bảng 4.8. Phân tích các biến .....	90
Bảng 4.9: Giá trị của các thông số mô hình của D.....	94
Bảng 4.10: Giá trị thực nghiệm và giá trị chẩn đoán của D .....	95
Bảng 4.11. Kết quả đo độ nhám $R_a$ và $S_a$ của các mẫu in .....	96
Bảng 4.12: Giá trị của các thông số mô hình của $R_a$ .....	101

Bảng 4.13: Giá trị thực nghiệm và giá trị chuẩn đoán của $R_a$ .....	102
Bảng 4.14: Giá trị của các thông số mô hình của $S_a$ .....	106
Bảng 4.15: Giá trị thực nghiệm và giá trị chuẩn đoán của $S_a$ .....	107
Bảng 4.16: Kết quả đo độ xốp của các mẫu in .....	114
Bảng 4.17: Giá trị của các thông số mô hình độ xốp .....	114
Bảng 4.18: Giá trị thực nghiệm và giá trị chuẩn đoán độ xốp .....	115

## DANH MỤC CÁC HÌNH VÀ ĐỒ THỊ

Hình. 0.1. Chuỗi quy trình sản xuất bồi đắp .....	1
Hình. 0.2. Sơ đồ trình tự nghiên cứu.....	3
Hình 1.1. Thiết kế lòng, lõi khuôn .....	6
Hình 1.2. Cuộc cách mạng công nghiệp và sự phát triển của công nghệ sản xuất bồi đắp 7	
Hình 1.3. Hệ thống sản xuất với việc ứng dụng quét và in 3D.....	8
Hình 1.4. Thứ tự các bước in 3D một sản phẩm.....	9
Hình 1.5. Tạo mô hình hộp giảm tốc từ in 3D .....	10
Hình 1.6. Phân loại các phương pháp sản xuất bồi đắp .....	11
Hình 1.7. Phân loại các phương pháp sản xuất bồi đắp với vật liệu kim loại .....	12
Hình 1.8. Số lượng đăng ký bảo hộ sáng chế về in 3D – .....	13
Hình 1.9. Số lượng nghiên cứu in 3D theo 7 nhóm công nghệ in (phân loại của ASTM) .....	13
Hình 1.10. Động cơ GE9X với các chi tiết in 3D với vật liệu Titan .....	14
Hình 1.11. Hướng nghiên cứu, sử dụng vật liệu trong in 3D hiện nay .....	14
Hình 1.12. Hướng nghiên cứu, sử dụng vật liệu trong in 3D theo thời gian .....	15
Hình 1.13. Bảo hộ về nghiên cứu, sử dụng vật liệu trong in 3D tại các quốc gia/ tổ chức .....	15
Hình 1.14. Máy in FDM .....	21
Hình 1.15. Máy in DLMD .....	21
Hình 1.16. Thiết bị GMAW sử dụng robot .....	22
Hình 1.17. Ứng dụng mảnh hợp kim Titanium in 3D tại Bệnh viện Đa khoa Tâm Anh .....	24
Hình 1.18. Các thông số ảnh hưởng tới chất lượng in bột.....	26
Hình 1.19. Cơ chế in SLM .....	27
Hình 2.1. Định nghĩa về độ sai lệch hình dạng.....	31
Hình 2.2. Các bước đánh giá sai lệch hình dạng sử dụng phương pháp quét mẫu .....	32
Hình 2.3. Phương pháp tiếp xúc để thu nhận dữ liệu .....	33
Hình 2.4. Phương pháp không tiếp xúc để thu nhận dữ liệu .....	33

Hình 2.5. Quy trình đánh giá mẫu in theo phương pháp quét 3D .....	34
Hình 2.6. Quy trình quét mẫu .....	35
Hình 2.7. Quy trình số hóa .....	36
Hình 2.8. Chất lượng bề mặt đạt được với các phương pháp in .....	37
Hình 2.9. Sơ đồ chuyển pha của vật liệu Ti6Al4V và xác định chiều dài của HTEZ.....	38
Hình 2.10. Tính toán bề mặt vùng ảnh hưởng nhiệt (HTEZ). .....	39
Hình 2.11. Định nghĩa của TG trong mô hình phân tích nhiệt .....	39
Hình 2.12. Mô hình truyền nhiệt khi in SLM .....	41
Hình 2.13. Các mô hình phân bố nguồn nhiệt .....	41
Hình 2.14. Mô hình Goldak biểu diễn phân bố năng lượng laser.....	42
Hình 2.15. Mô hình Gauss biểu diễn phân bố năng lượng laser.....	42
Hình 2.16. Nguyên lý in theo công nghệ nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc.....	43
Hình 2.17. Vùng truyền nhiệt trên mặt phẳng ZX .....	46
Hình 2.18. Vùng truyền nhiệt trên mặt phẳng XY .....	46
Hình 2.19. Các thành phần biến dạng nội tại .....	47
Hình 2.20. Phương pháp tính toán biến dạng nội tại của toàn bộ các lớp in theo bề mặt vùng xử lý nhiệt HTEZ .....	48
Hình 2.21. Các bước xác định phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ.....	51
Hình 2.22. Biểu diễn hình học trường hợp 3 nhân tố dạng mã hóa .....	53
Hình 3.1. Các bước thí nghiệm và hệ thống thiết bị .....	59
Hình 3.2. Máy in kim loại SLM FF-M180D tại công ty 3D HONY .....	60
Hình 3.3. Máy cắt dây EDM và sơ đồ nguyên lý cắt.....	61
Hình 3.4. Máy sấy bột kim loại 303-0B.....	61
Hình 3.5. Máy ủ nhiệt chân không Fastform 00-00012990.....	62
Hình 3.6. Ví dụ về biến dạng mẫu in khi cắt khỏi tấm nền.....	63
Hình 3.7. Hình dạng bột Ti6Al4V .....	63
Hình 3.8. Kích thước và hình dạng mẫu thí nghiệm.....	64
Hình 3.9. Modul Digitized shape editor.....	68
Hình 3.10. Mở định dạng dữ liệu STL.....	68
Hình 3.11. Mô đun tái tạo nhanh bề mặt.....	69

Hình 3.12. Thiết bị đo biến dạng hình học Scan 3D Handy Silver của hãng Creaform.....	69
Hình 3.13. Thiết bị đo độ nhám Zygo Zegage Pro HR .....	70
Hình 3.14. Thiết bị đo FESEM S4800 HITACHI.....	71
Hình 3.15. Các thông số đầu vào và đầu ra của mô phỏng số .....	72
Hình 3.16. Thiết kế thí nghiệm 3 nhân tố với hai mức đầy đủ .....	77
Hình 3.17. Các nhân tố đầu vào và hàm đầu ra của thực nghiệm.....	78
Hình 4.1. Các bước xác định mối liên hệ giữa thông số công nghệ với chỉ tiêu chất lượng.....	80
Hình 4.2. Các bước xác định độ sai lệch hình dạng.....	83
Hình 4.3. Quy ước hiển thị màu của các sai số.....	84
Hình 4.4. Các vùng đo độ nhám.....	84
Hình 4.5. Các bước đo độ nhám.....	85
Hình 4.6 Các bước đánh giá cấu trúc tế vi .....	87
Hình 4.7. Mẫu số 4 có độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất .....	89
Hình 4.8. Mẫu số 5 có độ sai lệch hình dạng lớn nhất.....	89
Hình 4.9. Biểu đồ Pareto của các biến .....	90
Hình 4.10. Đồ thị mối quan hệ giữa D với U, V khi $t = 0.03$ mm .....	92
Hình 4.11. Đồ thị mối quan hệ giữa D với U, V khi $t = 0.04$ mm .....	92
Hình 4.12. Đồ thị mối quan hệ giữa D với U, V khi $t = 0.05$ mm .....	93
Hình 4.13. Đồ thị mối quan hệ giữa D với U, V khi $t = 0.06$ mm .....	93
Hình 4.14. Đồ thị ảnh hưởng đơn yếu tố tới $R_a$ .....	97
Hình 4.15. Đồ thị ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố tới $R_a$ .....	97
Hình 4.16. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $R_a$ khi $t=0.03$ mm .....	98
Hình 4.17. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $R_a$ khi $t=0.04$ mm .....	99
Hình 4.18. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $R_a$ khi $t=0.05$ mm .....	99
Hình 4.19. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $R_a$ khi $t=0.06$ mm .....	100
Hình 4.20. Đồ thị ảnh hưởng đơn yếu tố tới $S_a$ .....	103
Hình 4.21. Đồ thị ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố tới $S_a$ .....	103
Hình 4.22. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $S_a$ khi $t=0.03$ mm.....	104

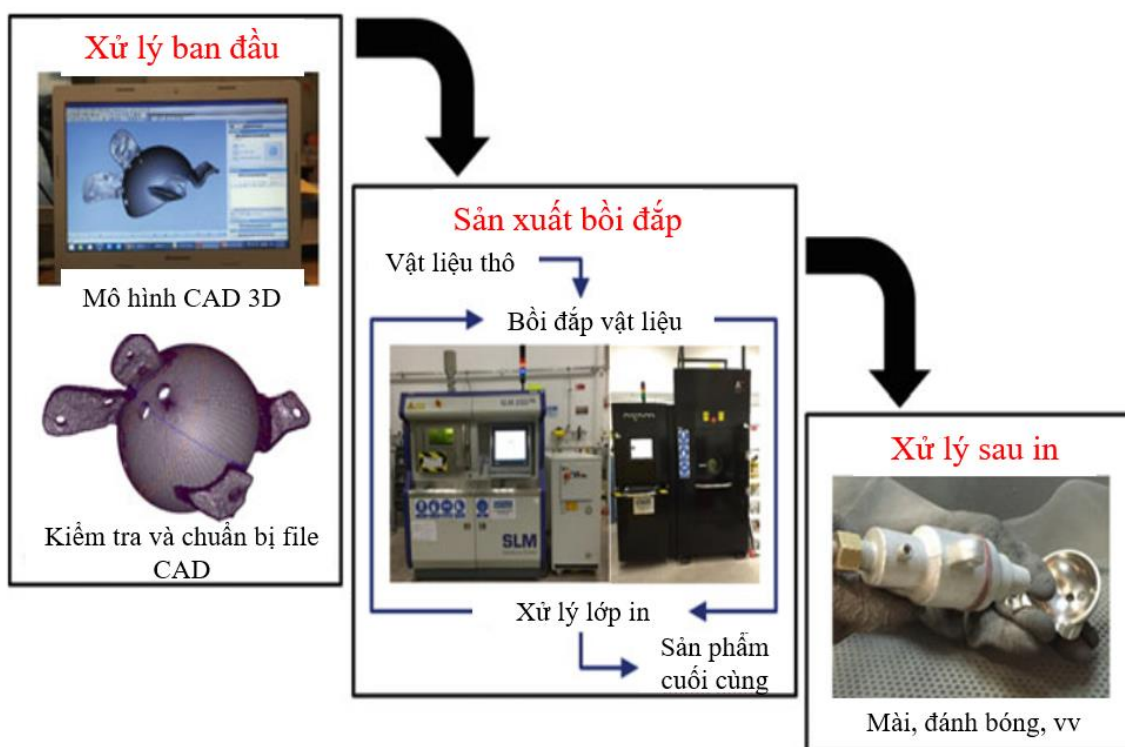
Hình 4.23. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $S_a$ khi $t=0.04$ mm.....	104
Hình 4.24. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $S_a$ khi $t=0.05$ mm.....	105
Hình 4.25. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới $S_a$ khi $t=0.06$ mm.....	105
Hình 4.26. Cấu trúc tế vi của mẫu in số 2 với độ xốp 3.78% .....	109
Hình 4.27. Cấu trúc tế vi của mẫu in số 7 với độ xốp 12.375% .....	110
Hình 4.28. Đồ thị mối liên hệ độ xốp và năng lượng thể tích laser .....	111
Hình 4.29. Kết quả tối ưu đơn mục tiêu D .....	117
Hình 4.30. Kết quả tối ưu đơn mục tiêu $R_a$ .....	118
Hình 4.31. Kết quả tối ưu đơn mục tiêu P.....	119
Hình 4.32. Kết quả tối ưu đa mục tiêu .....	121

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Cùng với sự phát triển của các hệ thống sản xuất thông minh nhằm nâng cao năng suất và chất lượng cho các phương pháp gia công cắt gọt truyền thống như tiện, phay, các hệ thống sản xuất bồi đắp đã và đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp, y tế. Nếu gia công cắt gọt là cắt bỏ vật liệu từ phôi để tạo thành chi tiết thì gia công bồi đắp là sự thêm vật liệu theo từng lớp để hình thành chi tiết.

Trong cuốn sách “Công nghệ in 3D” do Phùng Anh Tiến biên soạn, lịch sử và quy trình của in 3D đã được trình bày rất đầy đủ [1]. Hình 0.1 thể hiện quy trình của sản xuất bồi đắp bao gồm các bước từ xử lý mô hình CAD của chi tiết in trên máy tính, đến in 3D chi tiết trên máy in và cuối cùng là xử lý sau in như mài, đánh bóng để đạt được chất lượng sản phẩm theo yêu cầu.



**Hình. 0.1. Chuỗi quy trình sản xuất bồi đắp [1]**

Công nghệ sản xuất bồi đắp cho phép tạo ra các sản phẩm có hình dạng phức tạp, chủng loại sản phẩm lớn nên ngày càng được nghiên cứu cải tiến để mở rộng phạm vi ứng dụng. Tuy vậy, vấn đề chất lượng sản phẩm là một trong những rào cản để công nghệ sản xuất bồi đắp được ứng dụng rộng rãi. Hiện tại để cải thiện chất lượng sản

phẩm cần tới các phương pháp gia công truyền thống để xử lý sau in, điều này làm tăng chi phí sản xuất. Một trong những giải pháp đã và đang được nghiên cứu là đảm bảo được chất lượng trong quá trình in. Cụ thể là xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp để đảm bảo được các chỉ tiêu đầu ra như chất lượng bề mặt, độ chính xác kích thước và cơ tính của sản phẩm in.

Tuy vậy, hiện tại có nhiều phương pháp in khác nhau cho các vật liệu in khác nhau, các chỉ tiêu đầu ra cũng tùy thuộc vào từng ứng dụng cụ thể nên cũng có các yêu cầu khác nhau. Chính vì vậy, nghiên cứu chất lượng sản phẩm trong quá trình in là rất cần thiết với các ứng dụng thực tế.

Phương pháp in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc (Selective laser melting, viết tắt SLM) là một phương pháp sản xuất bồi đắp cho vật liệu bột kim loại. Ngày nay, phương pháp in SLM được sử dụng rộng rãi với các ưu điểm về hiệu quả sử dụng năng lượng laser để làm nóng chảy bột kim loại, đặc biệt với các vật liệu khó gia công như Ti6Al4V yêu cầu năng lượng nguồn laser lớn, nhiệt độ nóng chảy của vật liệu cao. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện với các bài toán ứng dụng cụ thể khác nhau đối với vật liệu bột Ti6Al4V theo phương pháp in SLM, trong đó tập trung nhiều vào vấn đề đảm bảo chất lượng của sản phẩm in trong mối liên hệ với các thông số công nghệ in. Tuy vậy, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào sự ảnh hưởng của công suất nguồn laser, tốc độ in, với chiều dày lớp in cố định. Trong khi chiều dày lớp in thay đổi cũng ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Mặt khác, sự ảnh hưởng của bộ thông số công nghệ này để đảm bảo đồng thời sai lệch hình dạng nhỏ nhất, độ nhám bề mặt nhỏ nhất, và diện tích in không lỗ rỗng lớn nhất cũng chưa được đánh giá đồng thời. Đây là một khoảng trống trong nghiên cứu cần được tiến hành nhằm xác định bộ thông số công nghệ in tối ưu, đảm bảo yêu cầu chất lượng sản phẩm in rất cần thiết khi áp dụng trong thực tế.

## **2. Mục tiêu nghiên cứu**

- Xây dựng mô hình toán thể hiện mối liên hệ giữa bộ thông số công nghệ in với các chỉ tiêu chất lượng sản phẩm in.
- Xác định bộ thông số công nghệ in tối ưu thỏa mãn các chỉ tiêu đầu ra.

## **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

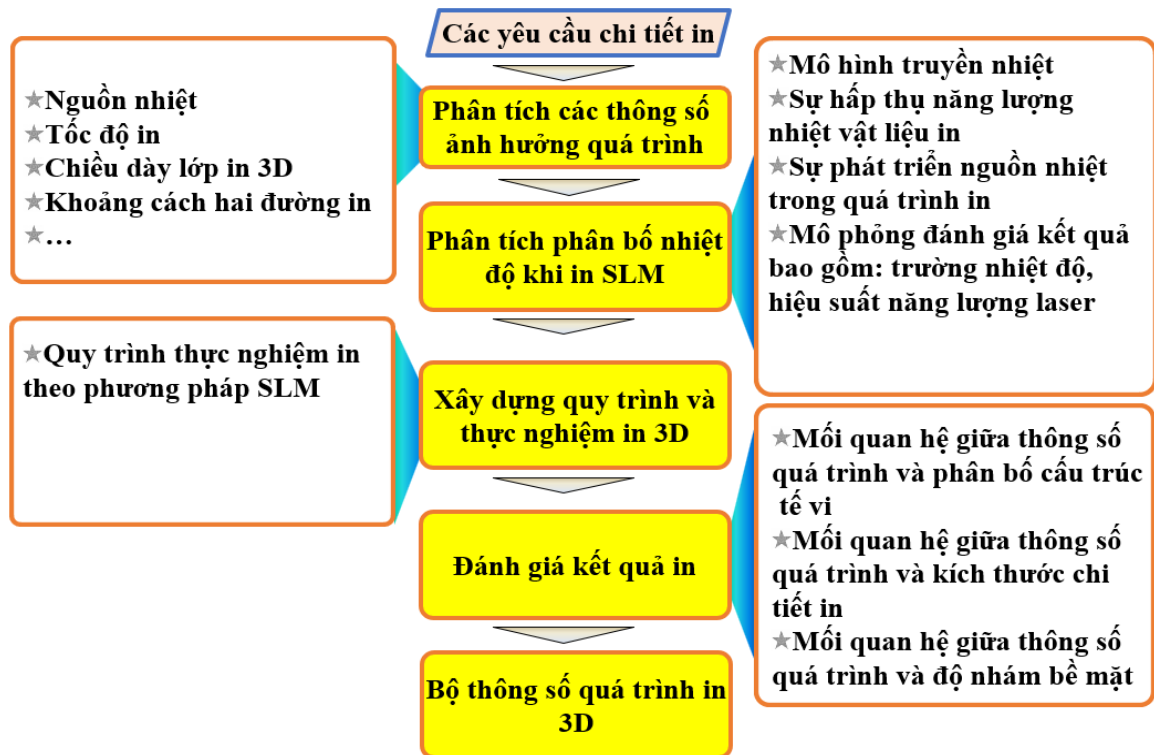
- **Đối tượng nghiên cứu:** Nghiên cứu ảnh hưởng của 3 tham số đầu vào bao gồm công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t) tới độ chính

xác hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và độ xốp của sản phẩm sau khi in 3D kim loại. Trong nghiên cứu này khoảng cách đường in được giữ không đổi và được tính bằng 80% đường kính hội tụ của chùm tia laser.

- **Phạm vi nghiên cứu:** Công nghệ in 3D vật liệu kim loại áp dụng cho chế tạo chi tiết từ vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V với kích thước bột trung bình 43  $\mu\text{m}$  theo phương pháp in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc (Selective Laser Melting -SLM).

#### 4. Phương pháp nghiên cứu

Với mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu trên, các bước tiến hành nghiên cứu được thể hiện trên Hình 0.2 với sự kết hợp của các phương pháp nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm.



*Hình. 0.2. Sơ đồ trình tự nghiên cứu*

##### a. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

- Cơ chế của quá trình in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc với bột kim loại Ti6Al4V.
- Thuộc tính nhiệt của vật liệu Ti6Al4V và trạng thái chuyển đổi pha.
- Xây dựng phương trình truyền nhiệt có xét tới thông số công nghệ in và thuộc tính nhiệt của vật liệu.

### **b. Phương pháp nghiên cứu mô phỏng**

- Ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn xác định trường nhiệt độ khi in vật liệu Ti6Al4V.
- Xác định mô hình nguồn năng lượng laser.
- Xác định bộ thông số công nghệ in thay cho các thí nghiệm khảo sát nhằm xác định phạm vi giới hạn bộ thông số công nghệ để phục vụ nghiên cứu thực nghiệm.

### **c. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm**

Phương pháp nghiên cứu là kết hợp lý thuyết kết hợp với thực nghiệm để kiểm chứng. Nội dung khái quát như sau:

- Nghiên cứu thực nghiệm để xác định bộ thông số ảnh hưởng (các thông số đầu vào) gồm: công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t) đến đến chỉ tiêu chất lượng sản phẩm in 3D gồm: độ chính xác hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và độ xốp khi in 3D. Trong đó xây dựng hàm đơn và đa mục tiêu mô tả mối quan hệ giữa bộ thông số công nghệ in SLM và các chỉ tiêu đầu ra về chất lượng
- Quá trình thực nghiệm được thực hiện trên mô hình thí nghiệm với sử dụng trang thiết bị đo lường tiên tiến;

## **5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

### **a. Ý nghĩa khoa học**

- Nghiên cứu xác định được các thông số công nghệ chính ảnh hưởng đến quá trình in 3D từ vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V theo phương pháp in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc SLM.
- Thiết lập được mô hình nguồn nhiệt, mô hình truyền nhiệt và phân tích được phân bố nhiệt khi in làm cơ sở để xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp.
- Thiết lập được mô hình toán học về mối quan hệ giữa các thông số công nghệ ảnh hưởng đến chỉ tiêu đầu ra là chất lượng sản phẩm in 3D, làm cơ sở khoa học cho việc xác định bộ thông số công nghệ in phù hợp.

**b. Ý nghĩa thực tiễn**

Kết quả nghiên cứu có thể làm tài liệu giảng dạy, nghiên cứu, cơ sở để áp dụng tại doanh nghiệp có ứng dụng công nghệ sản xuất bồi đắp nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm.

**6. Các đóng góp mới của luận án**

- Nghiên cứu hoàn thiện lý thuyết về quy trình công nghệ in 3D kim loại áp dụng cho in vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V;
- Phân tích mô phỏng quá trình nhiệt trong quá trình in, đây là quá trình phức tạp và có ảnh hưởng quyết định chất lượng sản phẩm in. Từ kết quả phân tích này có thể dự đoán được trạng thái phân bố nhiệt khi in nhằm đảm bảo trạng thái chảy của vật liệu ứng với bộ thông số công nghệ in tương ứng.
- Xây dựng được các mô hình dự đoán chất lượng sản phẩm in bao gồm công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t) ảnh hưởng đến chỉ tiêu chất lượng sản phẩm in 3D gồm: độ chính xác hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và độ xốp sản phẩm. Trong đó xây dựng hàm đơn và đa mục tiêu mô tả mối quan hệ giữa bộ 3 thông số công nghệ in SLM và các chỉ tiêu đầu ra về chất lượng.

**7. Bố cục của luận án**

Luận án gồm 4 chương:

Chương 1: Tổng quan về sản xuất bồi đắp và phương pháp in SLM với vật liệu Ti6Al4V.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết quá trình in 3D kim loại bằng công nghệ SLM.

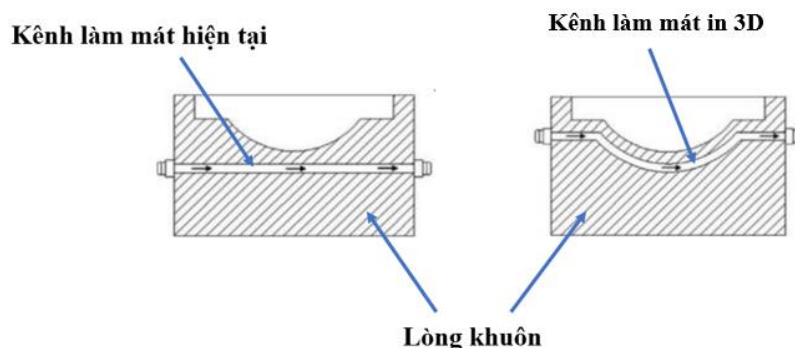
Chương 3: Hệ thống thí nghiệm và phương pháp nghiên cứu.

Chương 4: Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ khi in SLM đến các chỉ tiêu đầu ra.

## CHƯƠNG 1

### TỔNG QUAN VỀ SẢN XUẤT BỒI ĐÁP VÀ PHƯƠNG PHÁP IN SLM VỚI VẬT LIỆU Ti6Al4V

Công nghệ sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing, viết tắt AM) đã và đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực từ giáo dục, y tế đến các ứng dụng công nghiệp. Với sự phát triển của khoa học công nghệ và vật liệu mới, ngày nay công nghệ AM không những được sử dụng để tạo ra các sản phẩm mẫu (thường là vật liệu nhựa) trong giai đoạn thiết kế mà còn được sử dụng để tạo các chi tiết, sản phẩm cuối cùng với vật liệu kim loại. Công nghệ AM cho phép sản xuất các sản phẩm có hình dạng phức tạp mà các phương pháp gia công truyền thống khó hoặc thậm chí không thể xử lý được. Ví dụ, để gia công các lòng và lõi khuôn có các kênh làm mát theo biên dạng sản phẩm (kênh làm mát dạng đường cong theo bề mặt sản phẩm cần làm mát) để tăng hiệu quả làm mát thay vì phương pháp khoan truyền thống để tạo các kênh làm mát thẳng trong các khuôn ép sản phẩm nhựa, chỉ có công nghệ AM là phù hợp.



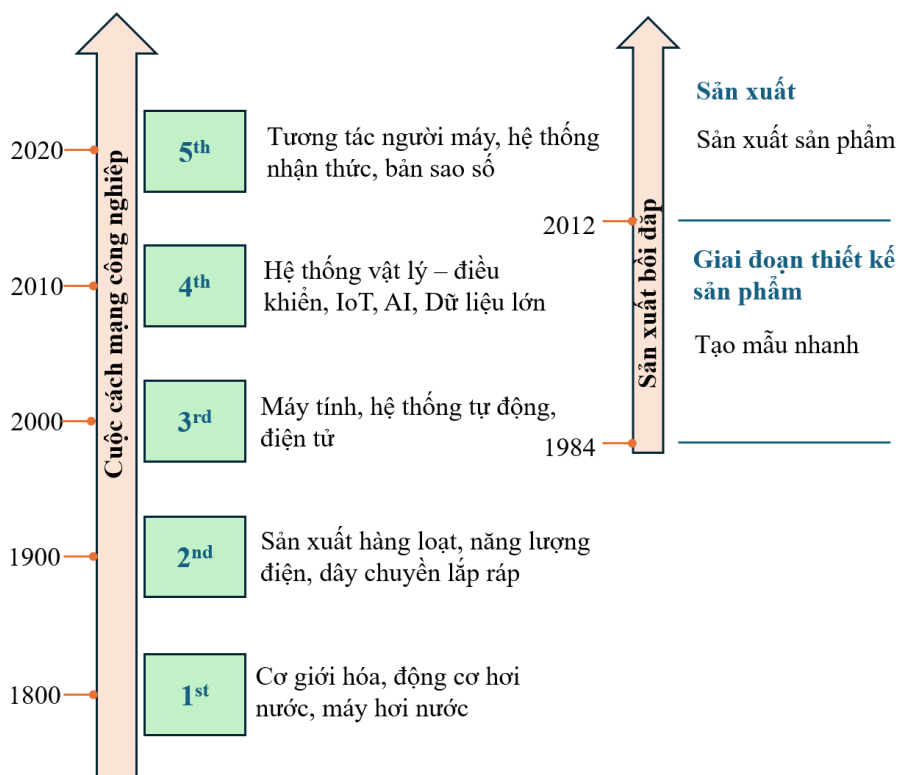
**Hình 1.1. Thiết kế lòng, lõi khuôn**

AM là công nghệ cốt lõi của Công nghiệp 4.0, nơi các công nghệ được sử dụng để cải thiện hiệu quả hoạt động và cải thiện chất lượng sản phẩm; và của Công nghiệp 5.0, nơi các công nghệ được sử dụng để nâng cao giá trị của sản phẩm cho khách hàng. Với xu hướng sản xuất định hướng khách hàng – mỗi khách hàng yêu cầu các sản phẩm đơn lẻ khác nhau và các chi tiết phức tạp, công nghệ AM được lựa chọn làm công nghệ sản xuất cốt lõi để chế tạo các chi tiết thỏa mãn yêu cầu trên.

## 1.1. Tổng quan về sản xuất bồi đắp

Theo định nghĩa của Hiệp hội vật liệu và thử nghiệm Hoa Kỳ (American Society for Testing Materials - ASTM) về sản xuất bồi đắp: “Công nghệ sản xuất đắp dần là một quá trình sử dụng các nguyên liệu để chế tạo nên mô hình 3D, thường là chồng từng lớp nguyên liệu lên nhau, và quá trình này trái ngược với quá trình cắt gọt vẫn thường dùng để chế tạo xưa nay” [1]. Sản xuất bồi đắp (AM) hoặc sản xuất từng lớp hoặc in 3D đã được ứng dụng hiệu quả trong các lĩnh vực như hàng không vũ trụ, kỹ thuật ô tô, kỹ thuật y sinh và năng lượng. Để có được sự chấp nhận của công nghiệp đối với AM bên cạnh sản xuất truyền thống, AM đã được nghiên cứu, cải tiến và trở thành một trong những công nghệ cốt lõi của cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4 và lần thứ 5.

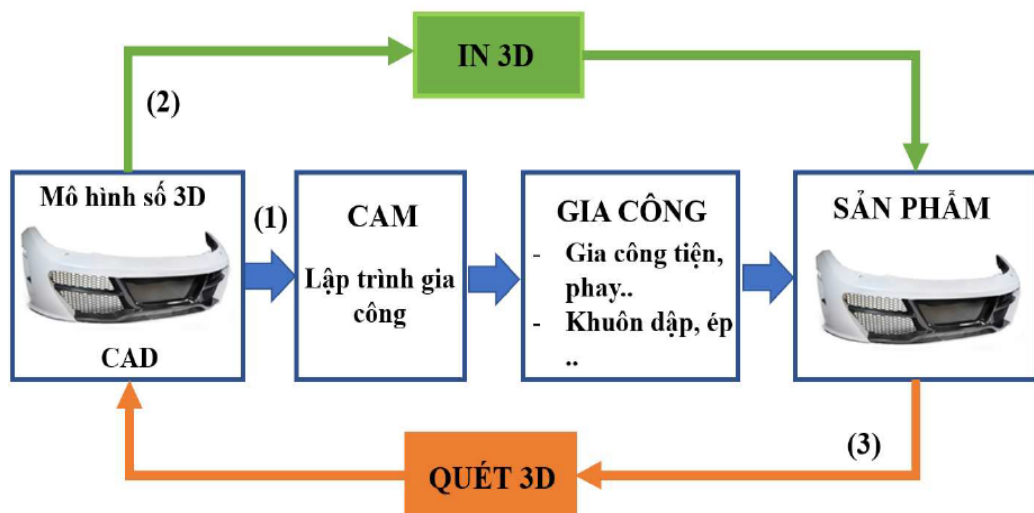
Cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4 và lần thứ 5 và sự phát triển của công nghệ sản xuất bồi đắp được các tác giả trình bày chi tiết trong các bài “The Development of Manufacturing Industry Revolutions from 1.0 to 5.0”, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0” và “Additive Manufacturing: New Trends in the 4th Industrial Revolution” [2-4].



**Hình 1.2. Cuộc cách mạng công nghiệp và sự phát triển của công nghệ sản xuất bồi đắp**

Hình 1.2 cho thấy những thay đổi của ngành công nghiệp từ cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ nhất đến hiện tại và sự phát triển của AM cũng như sự đóng góp và vai trò của AM trong cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4 và lần thứ 5. Trong giai đoạn đầu từ năm 1984 đến năm 2012, AM đã đóng góp vào cuộc cách mạng công nghiệp với vai trò tạo mẫu nhanh các sản phẩm bằng vật liệu nhựa trong giai đoạn thiết kế sản phẩm. Từ năm 2012 đến nay, với sự phát minh ra các phương pháp in mới, có thể in các sản phẩm bằng nhiều loại vật liệu, đặc biệt là vật liệu kim loại. Các sản phẩm in đảm bảo chất lượng và các tính chất vật lý, cơ học theo yêu cầu. Sản xuất thông minh và tự động hóa được áp dụng cho các công ty sản xuất để đạt được hiệu quả, năng suất, chất lượng và khả năng cạnh tranh. Công nghiệp 4.0 với các hệ thống mạng vật lý, internet vạn vật (IoT), trí tuệ nhân tạo (AI), dữ liệu lớn cho phép tăng năng suất, chất lượng của các hệ thống sản xuất. Với cuộc cách mạng công nghiệp 5.0 lấy con người làm trung tâm, các giải pháp lấy con người làm trung tâm, tự chủ, hệ thống nhận thức và số hóa được coi là các yếu tố cốt lõi. Với giá trị thúc đẩy trong Công nghiệp 5.0, nhu cầu và lợi ích cốt lõi của con người được đặt ở trung tâm của quá trình sản xuất.

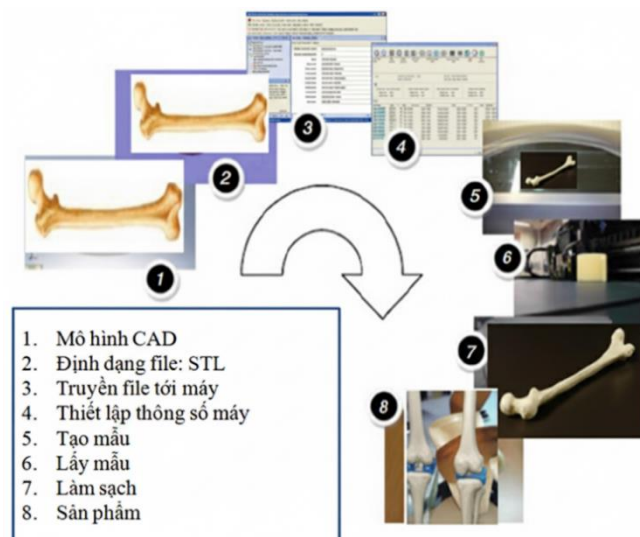
Với các hệ thống sản xuất hiện nay, mô hình 3D của sản phẩm được thiết kế trên máy tính thông qua các công cụ CAD (thiết kế hỗ trợ máy tính). Sau đó, với việc ứng dụng các công cụ CAM (sản xuất hỗ trợ máy tính), có thể thiết lập đường chạy dao cho quá trình gia công cũng như thiết lập các thông số quy trình gia công. Từ đó, chương trình G-code được tạo ra cho các máy CNC (điều khiển số bằng máy tính) để gia công chi tiết. Quá trình này được thể hiện bằng đường ngang trong Hình 1.3.



*Hình 1.3. Hệ thống sản xuất với việc ứng dụng quét và in 3D*

Cùng với sự phát triển của công nghệ, công nghệ quét 3D đã được ứng dụng trong đánh giá chất lượng sản phẩm (độ chính xác hình học của sản phẩm) thông qua máy đo tọa độ CMM (phương pháp đo tiếp xúc) hoặc thông qua máy quét laser (phương pháp đo không tiếp xúc). Các sản phẩm cuối cùng này được quét để kiểm tra và đánh giá các sai số hình học thông qua máy quét 3D và phần mềm xử lý dữ liệu quét. Mô hình 3D được tạo ra từ dữ liệu quét được sử dụng để so sánh với mô hình 3D gốc nhằm xác định giá trị độ lệch kích thước sau khi gia công.

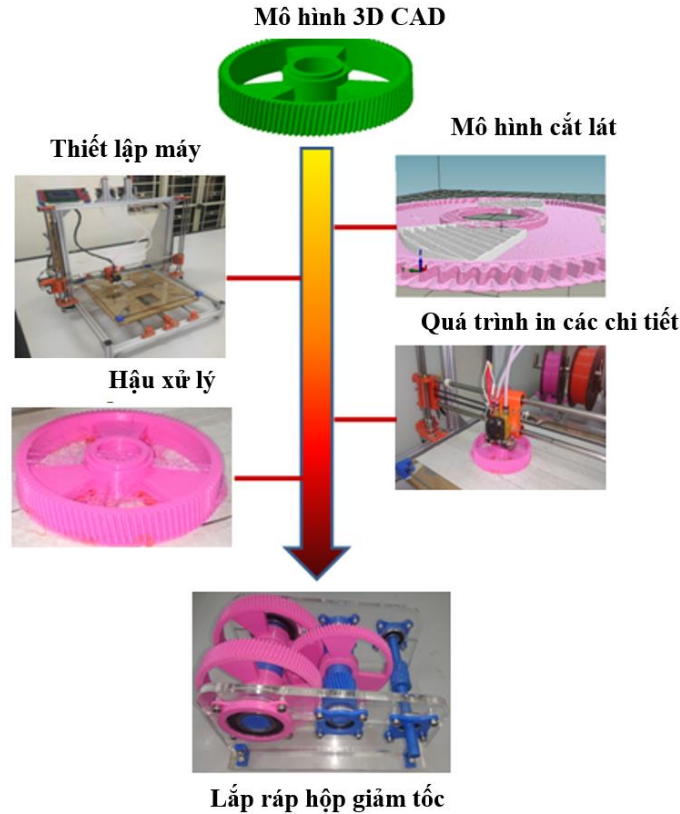
Hình 1.4 thể hiện ví dụ các bước để in 3D một sản phẩm từ mô hình CAD ban đầu. Để in một chi tiết, mô hình CAD 3D ở định dạng STL được cắt lát và gửi đến máy in. Các thông số in được xác định trên máy để in. Sau khi in một lớp, một lớp khác được thêm vào mô hình. Quá trình này được lặp lại cho đến khi toàn bộ bộ phận được in. Quá trình hậu xử lý như làm sạch, cắt chi tiết khỏi tấm nền, xử lý bề mặt được áp dụng để đảm bảo các yêu cầu làm việc của chi tiết.



**Hình 1.4. Thứ tự các bước in 3D một sản phẩm**

Trước đây, công nghệ in 3D hay công nghệ sản xuất từng lớp chỉ được sử dụng để tạo ra các mẫu ban đầu, hay còn gọi là tạo mẫu nhanh. Đây là một công đoạn cần thiết trong quá trình nghiên cứu và phát triển sản phẩm. Với ứng dụng này, công nghệ in 3D chủ yếu sử dụng vật liệu nhựa để tạo ra sản phẩm. Hình 1.5 thể hiện ứng dụng in 3D vật liệu sợi nhựa để in các chi tiết bánh răng, trục của hộp giảm tốc làm các mô hình trực quan phục vụ đào tạo. Ngày nay, với những cải tiến về công nghệ, công nghệ in 3D cho phép in các sản phẩm bằng vật liệu kim loại với nguyên liệu ban đầu ở dạng bột hoặc dạng sợi. Các sản phẩm in này đã được chứng minh là không chỉ đạt

được các yêu cầu về hình học mà còn đảm bảo các yêu cầu về vật lý và cơ học, đảm bảo chức năng làm việc. Như vậy, với việc ứng dụng công nghệ in 3D và công nghệ quét 3D, quá trình sản xuất là một vòng khép kín.



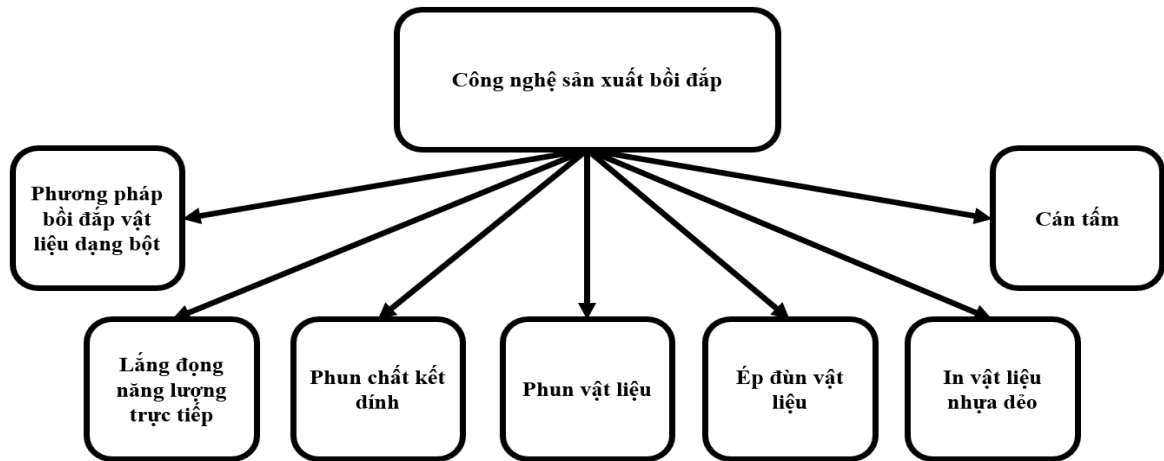
**Hình 1.5. Tạo mô hình hộp giảm tốc từ in 3D**

Ngày nay, có rất nhiều phương pháp in được sử dụng, mỗi phương pháp in cũng áp dụng cho vật liệu tương ứng như phương pháp in FDM (fused deposition modelling) thường được áp dụng để tạo ra các sản phẩm nhựa; phương pháp in SLM (selective laser melting) và phương pháp in DMLS (direct metal laser sintering) thường được áp dụng để in các sản phẩm kim loại từ dạng bột. Vật liệu in cũng rất đa dạng từ nhựa đến kim loại, ở dạng sợi, bột, chất lỏng (thường là vật liệu nhựa).

Sản xuất bồi đắp được phân loại theo phương pháp hình thành sản phẩm in; loại vật liệu in như rắn, bột hoặc lỏng; và năng lượng nhiệt để xử lý. Với phương pháp tạo thành sản phẩm in như thể hiện trong Hình 1.6, các phương pháp AM được phân loại thành 7 nhóm theo bài báo “Basics of laser powder bed fusion”, “Recent Advances

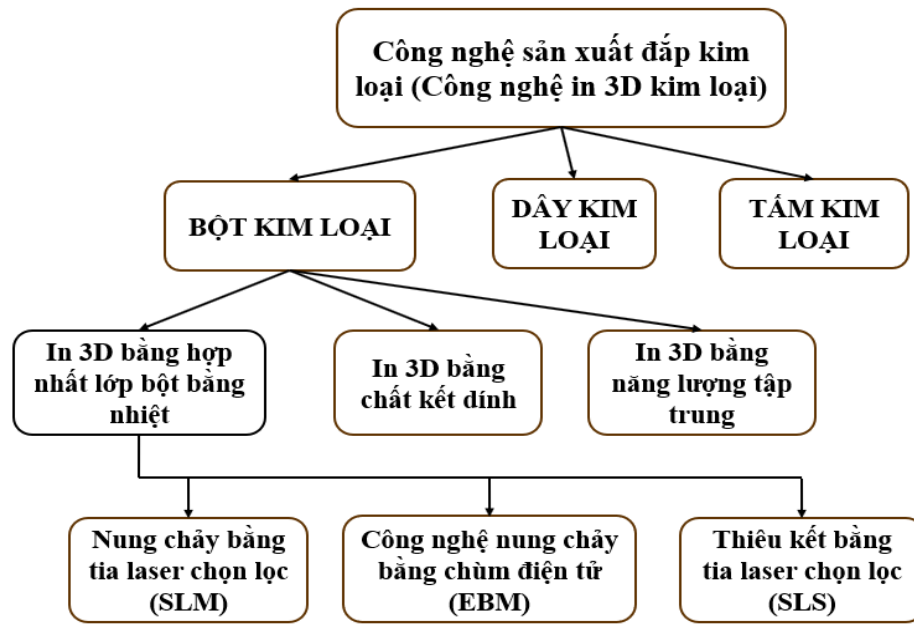
in Laser-Based Additive Manufacturing” và “Công nghệ in 3D- Xu hướng nghiên cứu công nghệ trên thế giới và một số ứng dụng tại Việt Nam” [5,6,7] với kết quả:

- (1) Phương pháp bồi đắp vật liệu dạng bột (Powder Bed Fusion- PBF);
- (2) Lắng đọng năng lượng trực tiếp (Directed Energy Deposition-DED);
- (3) Phun chất kết dính (Binder Jetting-BJ);
- (4) Phun vật liệu (Material Jetting-MJ);
- (5) Ép đùn vật liệu (Material Extrusion-ME);
- (6) In vật liệu nhựa dẻo (VAT Polymerization);
- (7) Cán tấm (Sheet Lamination).



**Hình 1.6. Phân loại các phương pháp sản xuất bồi đắp**

Các quy trình PBF cho vật liệu kim loại như thể hiện ở Hình 1.7 bao gồm thiêu kết laser thiêu kết chọn lọc (selective laser sintering -SLS), nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc (selective laser melting -SLM) và nóng chảy bột kim loại bằng chùm tia điện tử (electron beam melting -EBM). Trong SLS, quy trình sử dụng chùm tia laser làm nguồn nhiệt với độ chính xác tạo hình và bề mặt chất lượng tốt. SLS có thể in với nhiều loại vật liệu và sản phẩm có cấu trúc bên trong phức tạp. Trong EBM, quy trình sử dụng chùm tia điện tử năng lượng cao làm nguồn nhiệt, có tốc độ tạo hình nhanh hơn và ứng suất dư nhiệt tạo hình thấp, có thể tạo thành vật liệu có điểm nóng chảy cao và vật liệu giòn. So với SLS và EBM, phương pháp SLM được sử dụng phổ biến hơn trong các ứng dụng công nghiệp.



**Hình 1.7. Phân loại các phương pháp sản xuất bồi đắp với vật liệu kim loại [6]**

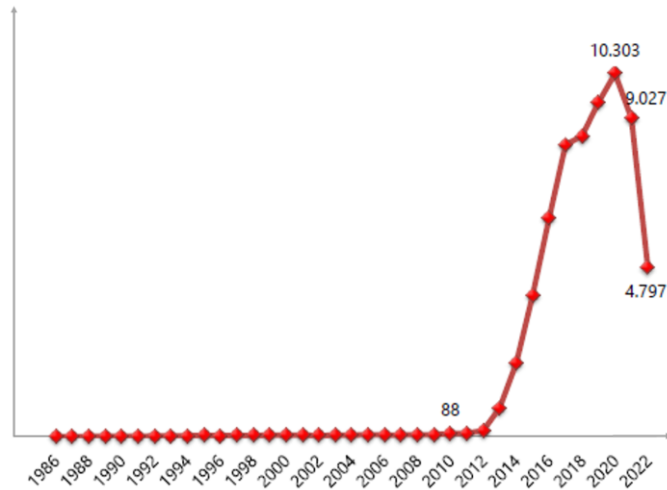
Với sự phát triển của khoa học và công nghệ, công nghệ sản xuất bồi đắp (AM) cho phép người dùng không chỉ cung cấp nguyên mẫu nhanh chóng mà còn chế tạo các chi tiết cho các ứng dụng cụ thể trực tiếp trong thời gian ngắn. Máy in 3D cho phép tạo ra các sản phẩm có hình dạng phức tạp mà các phương pháp gia công truyền thống không thể thực hiện được (ví dụ tạo các kênh làm mát theo đường viền sản phẩm cho khuôn ép nhựa) hoặc tạo ra các sản phẩm chuyên biệt cho từng khách hàng như trong lĩnh vực y tế (in xương, răng phù hợp với từng khách hàng khác nhau), công nghệ in 3D ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực. Hiện nay, có rất nhiều loại máy in 3D với các phương pháp in và vật liệu in khác nhau. Do đó, Khorasani và cộng sự khẳng định, tùy thuộc vào mục đích sử dụng, cũng như yêu cầu đầu ra của sản phẩm in cần đạt được mà quyết định lựa chọn phương pháp in phù hợp [8].

## **1.2. Tình hình nghiên cứu ngoài nước**

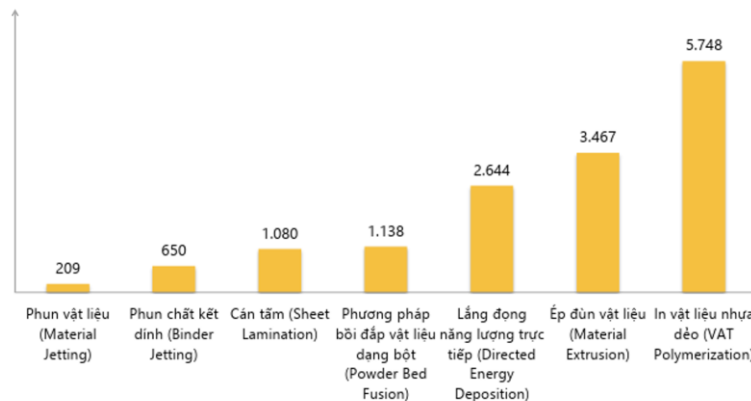
### **1.2.1. Tình hình nghiên cứu về sản xuất bồi đắp**

Các nghiên cứu về công nghệ AM tập trung nhiều trong những năm gần đây. Dữ liệu thống kê của WIPS Global về số lượng đăng ký bảo hộ sáng chế về in 3D trong giai đoạn 1986 đến 2022 thể hiện trên Hình 1.8. Trong đó số lượng đăng ký bảo hộ sáng chế về in 3D nhiều nhất là năm 2018 với 10303 đăng ký. Trong đó, quy trình in vật liệu nhựa dẻo, ép đùn vật liệu, lắng đọng năng lượng trực tiếp đang là 3 quy trình có nhiều sáng chế được bảo hộ nhất (tỉ lệ lần lượt là 38%, 23%

và 18%). Số lượng đăng ký bảo hộ sáng chế của nhóm in 3D – PBF trong giai đoạn 1986 đến 2022 là 1138 đăng ký sáng chế (chiếm tỉ lệ 7.6% trong tổng số các đăng ký sáng chế của 7 nhóm in) được thể hiện trong Hình 1.9.



**Hình 1.8. Số lượng đăng ký bảo hộ sáng chế về in 3D – (dữ liệu WIPS Global) [7]**



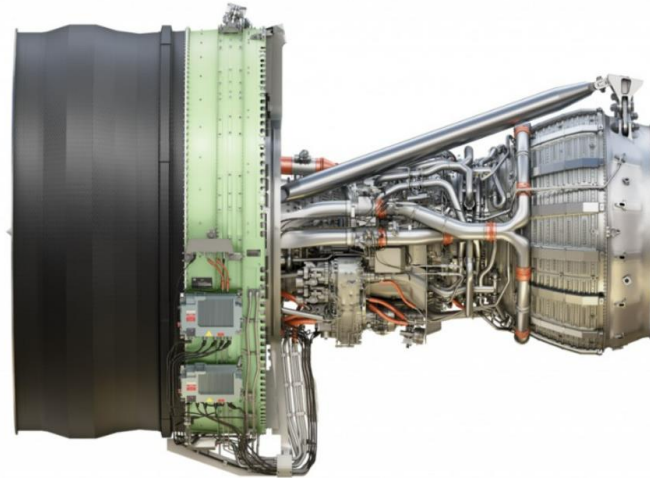
**Hình 1.9. Số lượng nghiên cứu in 3D theo 7 quy trình phân loại của ASTM [7]**

Qua dữ liệu thống kê nhận thấy rằng, tuy có nhiều ứng dụng trong thực tế nhưng hiện tại các nghiên cứu về in 3D vật liệu kim loại nói chung và nghiên cứu về PBF-SLM vẫn còn hạn chế. Các nghiên cứu phần lớn tập trung vào vật liệu nhựa.

Các hướng nghiên cứu về in 3D kim loại tập trung vào:

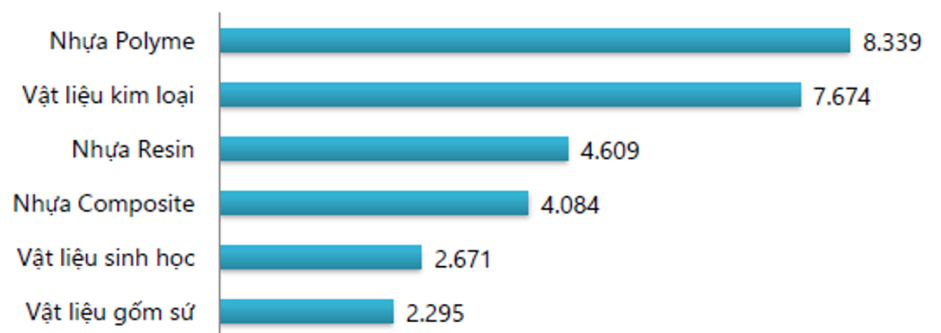
- **Nghiên cứu ứng dụng in 3D trong các lĩnh vực đặc thù:**

Với các nghiên cứu về cải thiện chất lượng in, vật liệu mới, công nghệ in 3D ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt với một số lĩnh vực đặc thù như hàng không, y tế yêu cầu các chi tiết in đạt được yêu cầu kỹ thuật cao với vật liệu là hợp kim Titan.



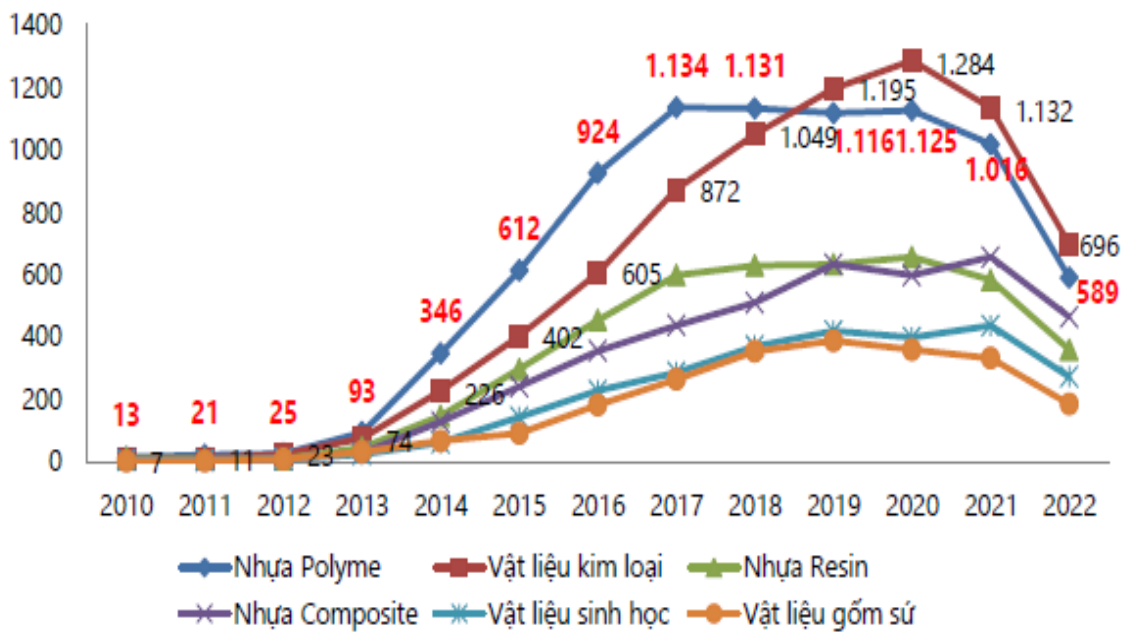
**Hình 1.10. Động cơ GE9X với các chi tiết in 3D với vật liệu Titan [9]**

Hình 1.10 thể hiện động cơ tuabin phản lực GE9X sử dụng AM kim loại để in các chi tiết vòi phun nhiên liệu, các chi tiết của bộ trao đổi nhiệt, vỏ cảm biến, các chi tiết của bộ trộn buồng đốt, các chi tiết bộ phận nạp và cánh tua bin từ hợp kim Titan. Ngoài các nghiên cứu ứng dụng phổ biến cho các sản phẩm nhựa, các nghiên cứu về vật liệu sinh học, vật liệu kim loại, composite, vật liệu gốm sứ cũng đã được các nhà khoa học tập trung nghiên cứu cho các ứng dụng đặc thù. Hình 1.11 thể hiện hướng nghiên cứu, sử dụng vật liệu trong in 3D hiện nay thông qua số lượng các đăng ký bảo hộ sáng chế. Trong giai đoạn 2010-2022 thể hiện các nghiên cứu về vật liệu in 3D kim loại được tập trung nghiên cứu ứng dụng nhiều (Hình 1.12).



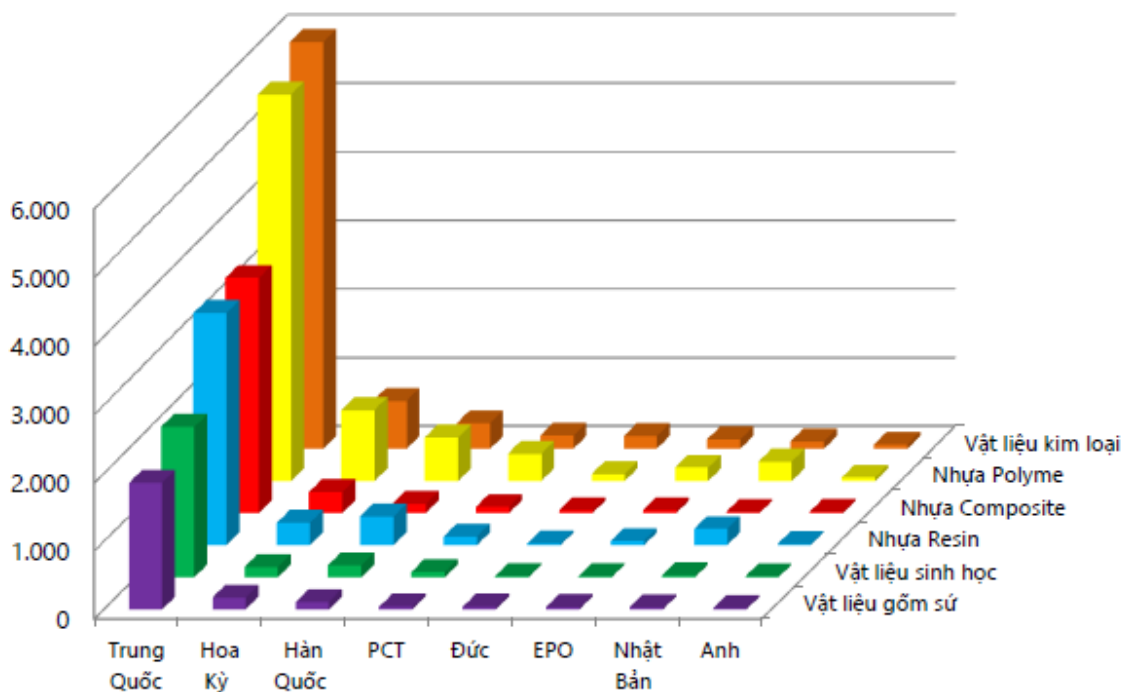
**Hình 1.11. Hướng nghiên cứu, sử dụng vật liệu trong in 3D hiện nay [7]**

Nhựa polyme là loại vật liệu được nghiên cứu và sử dụng nhiều nhất, với hơn 8.300 sáng chế (chiếm 28% trong tổng số sáng chế về các vật liệu in 3D thông dụng).



**Hình 1.12. Hướng nghiên cứu, sử dụng vật liệu trong in 3D theo thời gian (2010-2022) [7]**

Trong các loại vật liệu in 3D, kim loại là nhóm duy nhất có số lượng sáng chế vượt quá con số 1.200 sáng chế/năm (năm 2020) [7].



**Hình 1.13. Bảo hộ về nghiên cứu, sử dụng vật liệu trong in 3D tại các quốc gia/tổ chức [7]**

- ***Nghiên cứu ứng dụng AI cho các hệ thống in 3D:***

Với các hệ thống AM hiện tại, vấn đề chất lượng sản phẩm in cần được xem xét. Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc áp dụng AI vào hệ thống AM cho phép cải thiện chất lượng sản phẩm, giảm thiểu lỗi in [10,11]. Hiện nay, AI được đề xuất áp dụng ở cả giai đoạn thiết kế sản phẩm và giai đoạn in sản phẩm [12]. Goh và đồng nghiệp đã phân tích về việc tích hợp sử dụng AI vào hệ thống AM, đặc biệt trong lĩnh vực thiết kế, tối ưu hóa quy trình và giám sát chất lượng trong bài báo “A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges” [13]. Trong giai đoạn thiết kế sản phẩm, việc sử dụng AI cho phép tối ưu hóa thiết kế để đảm bảo chức năng của bộ phận đồng thời giảm chi phí vật liệu. Mặt khác, AI cũng được ứng dụng trong việc lập kế hoạch in như sử dụng thuật toán để nhận dạng các đặc điểm của sản phẩm in để tạo ra các chiến lược in tối ưu. Trong giai đoạn in sản phẩm, AI được sử dụng để theo dõi chất lượng sản phẩm trong quá trình in. Với sự kết hợp của dữ liệu từ cảm biến và camera, các hệ thống điều khiển dựa trên AI cho phép chúng ta điều chỉnh quy trình in sao cho phù hợp với trạng thái hiện tại của hệ thống.

- ***Nghiên cứu xây dựng, cập nhật hệ thống tiêu chuẩn cho sản xuất bồi đắp:***

Để triển khai các hệ thống AM trong ngành công nghiệp, một hệ thống tiêu chuẩn về thuật ngữ, vật liệu, quy trình in, phương pháp thử nghiệm, thiết kế và dữ liệu thiết kế là điều cần thiết để thiết lập các quy định chung. Phụ lục 1 cho thấy các tiêu chuẩn của quy trình AM bao gồm các tiêu chuẩn cũ và các tiêu chuẩn đã cập nhật. Trước đây, ASTM F2792-12a, ISO 17296-1 và ISO/ASTM 52921-13 được sử dụng cho thuật ngữ. Ngày nay, các quy định về thuật ngữ trong sản xuất bồi đắp sử dụng tiêu chuẩn ISO/ASTM52900-21 đã cập nhật.

Các tiêu chuẩn về vật liệu được sử dụng trong sản xuất bồi đắp cũng như quy trình in 3D được cập nhật bao gồm nhiều loại vật liệu và phương pháp in. Năm 2016, chỉ có các tiêu chuẩn về thông số kỹ thuật vật liệu cụ thể bao gồm các yêu cầu về tính chất cơ học tối thiểu được công bố cho Ti6Al4V, Ti6Al4V-ELI, Inconel718 và -625, CoCrMo, 316L, 15-5PH và 17-4PH [14]. Cho đến nay, đã có các tiêu chuẩn cho nhiều loại vật liệu.

Như đã đề cập ở trên, vấn đề chất lượng sản phẩm in cần được xem xét để đảm bảo rằng sản xuất bồi đắp được sử dụng như một phương pháp xử lý để tạo ra sản phẩm cuối cùng [15]. Do đó, các tiêu chuẩn để kiểm tra và đánh giá chất lượng sản phẩm in là rất cần thiết. ASMT và ISO đã hợp tác để phát triển các tiêu chuẩn quốc tế như ISO/ASTM52907-19, ISO/ASTM52902-23, ISO/ASTMTR52905-EB, v.v. Trước đây, các tiêu chuẩn cho phương pháp thử nghiệm chỉ là ISO 17296-3 và F2921-11e3.

Về các tiêu chuẩn cho thiết kế và định dạng dữ liệu thiết kế, trước đây có hai tiêu chuẩn là ISO 17296-4 và ISO/ASMT 52915-13. Ngày nay, hệ thống tiêu chuẩn đã được cập nhật với các cấu trúc dữ liệu và số liệu cho các phương pháp sản xuất bồi đắp.

### ***1.2.2. Tình hình nghiên cứu về in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc với vật liệu Ti6Al4V***

Vật liệu bột Ti6Al4V được sử dụng với phương pháp in SLM cho các sản phẩm hàng không vũ trụ hoặc y tế do có độ bền mỏi và các đặc tính cơ học đặc biệt cao, đảm bảo các yêu cầu làm việc của chi tiết như được giới thiệu trong bài báo “In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing” và “Microstructure and fatigue performance of SLM-fabricated Ti6Al4V alloy after different stress-relief heat treatments” [15, 16].

Độ nhám bề mặt và các đặc điểm cấu trúc tế vi là những chỉ số quan trọng về chất lượng của các chi tiết in. Độ nhám bề mặt ảnh hưởng đến điều kiện làm việc của các chi tiết. Các đặc điểm cấu trúc tế vi ảnh hưởng đến các tính chất cơ học của các chi tiết in. Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt và sự hình thành cấu trúc tế vi của các sản phẩm in như tính chất vật liệu, phân bố kích thước bột và các thông số công nghệ của quá trình in.

Độ nhám bề mặt mong muốn ( $R_a$ ) của các chi tiết in bằng phương pháp in SLM dao động từ 2 đến 10  $\mu\text{m}$  tùy thuộc vào vật liệu và các thông số công nghệ của quá trình in. Một số nghiên cứu thực nghiệm về độ nhám bề mặt khi in bột kim loại bằng phương pháp in SLM đã được công bố. Các nghiên cứu thực nghiệm với bột kim loại CoCr trên máy in SLM đạt được giá trị độ nhám bề mặt  $R_a$  dao động từ 3.382 đến 7.410  $\mu\text{m}$ , với công suất laser từ 88 đến 106 W; Tốc độ in từ 250 đến 1000 mm/giây [17].

Nghiên cứu ảnh hưởng của phân bố kích thước hạt đến chất lượng bề mặt và tính chất cơ học của mẫu in bằng phương pháp in SLM đã được một số nhà nghiên cứu thực hiện. Kết quả nghiên cứu với 3 loại bột thép 316L có phân bố kích thước hạt tăng dần cho thấy, khi độ dày lớp in  $t = 0.03$  mm, mật độ năng lượng thể tích  $E$  nằm trong khoảng từ 50 đến 100 J/mm<sup>3</sup>, kích thước hạt nhỏ (kích thước hạt trung bình 15.12  $\mu\text{m}$ ) sẽ cho  $R_a$  trong khoảng từ 5 đến 7  $\mu\text{m}$ ; kích thước hạt lớn (kích thước hạt trung bình 37.70  $\mu\text{m}$ ) sẽ cho  $R_a$  trong khoảng từ 8 đến 13  $\mu\text{m}$  [18].

Nghiên cứu vật liệu bột Ti6Al4V có kích thước hạt trung bình 23.37  $\mu\text{m}$  bằng phương pháp in SLM. Trong đó, bộ thông số quy trình in bao gồm công suất laser thay đổi từ 100 đến 200 W, tốc độ in từ 600 đến 1600 mm/giây và độ dày lớp in không đổi  $t = 0.03$  mm. Nghiên cứu cho thấy giá trị  $R_a$  đạt được nằm trong khoảng từ 5 đến 15  $\mu\text{m}$ . Khi công suất laser tăng, giá trị  $R_a$  giảm; khi tốc độ in tăng, giá trị  $R_a$  tăng. Trong nghiên cứu này, sự thay đổi độ dày lớp in không được đánh giá [19].

Độ dày lớp in bằng SLM thường nằm trong khoảng từ 20 đến 100  $\mu\text{m}$  sử dụng bột có kích thước hạt từ 20 đến 45  $\mu\text{m}$ . Độ dày lớp in lớn đòi hỏi công suất laser cao để đảm bảo vật liệu nóng chảy hoàn toàn. Chất lượng bề mặt in tốt hơn và mịn hơn khi in với độ dày nhỏ. Abele và cộng sự đã đề xuất một phương pháp in gọi là nóng chảy laser chọn lọc vi mô ( $\mu\text{SLM}$ ) với độ dày lớp in nhỏ hơn 20  $\mu\text{m}$  và vật liệu bột in cần thiết có đường kính hạt trung bình nhỏ hơn 10  $\mu\text{m}$ . Với  $\mu\text{SLM}$ , các nghiên cứu thực nghiệm với bột kim loại 316L có đường kính hạt trung bình  $D_{50} = 3.62$   $\mu\text{m}$ , tốc độ in trong khoảng 200 đến 2500 mm/s, công suất laser từ 25 đến 40 W, độ dày lớp in 7  $\mu\text{m}$ , giá trị  $R_a$  nhỏ nhất đạt được là 3.51  $\mu\text{m}$  [20].

Đối với các ứng dụng y tế, dụng cụ y tế và các chi tiết phẫu thuật có yêu cầu tiết trùng cao, độ nhám bề mặt trung bình đạt được ( $R_a$ ) nhỏ hơn 0.8  $\mu\text{m}$  [20]. Với yêu cầu này, cả SLM và  $\mu\text{SLM}$  đều không thể đáp ứng và thường cần các giải pháp xử lý bề mặt sau khi in để đạt được yêu cầu  $R_a$  nêu trên.

Trong nội dung nghiên cứu của luận án, giá trị thay đổi của cả 3 yếu tố bao gồm công suất laser, tốc độ in và độ dày lớp in đều được xem xét. Sự thay đổi của bất kỳ thông số nào trong 3 thông số này đều sẽ ảnh hưởng đến giá trị năng lượng thể tích  $E$ .

Chất lượng sản phẩm in bao gồm độ chính xác hình dạng hình học, độ chính xác kích thước [21] và các tính chất cơ lý [22] đảm bảo yêu cầu làm việc của sản phẩm. Hiện nay, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào chất lượng bề mặt và tính chất cơ lý, trong khi độ chính xác hình dạng, một trong những tiêu chí quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm, đặc biệt là sản phẩm cuối cùng, lại ít được nghiên cứu [23, 24]. Độ lệch hình dạng bao gồm độ lệch dương và độ lệch âm, là sự khác biệt giữa hình dạng chi tiết mong muốn và hình dạng chi tiết thu được.

Độ lệch hình dạng của sản phẩm in là do tác động của năng lượng nhiệt trong quá trình thiêu kết bột kim loại và sự chuyển pha nhanh chóng từ rắn sang lỏng và ngược lại. Siyambaş và cộng sự đã tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của các thông số in, bao gồm công suất laser và tốc độ in, đến độ chính xác hình dạng khi in bột hợp kim AlSi10Mg bằng phương pháp SLM. Trong nghiên cứu thực nghiệm này, công suất laser được chọn trong khoảng từ 170 W đến 390 W, tốc độ in từ 534 mm/giây đến 1225 mm/giây, và độ dày lớp in được giữ không đổi ở mức 0.03 mm. Sự thay đổi độ dày lớp in cũng là một yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác của sản phẩm in, nhưng chưa được xem xét trong nghiên cứu này [23]. Ngoài các thông số in, các thông số thiết kế như hướng chi tiết, độ dày chi tiết, vị trí in và kích thước chi tiết cũng ảnh hưởng đến độ chính xác hình học của chi tiết in [25]. Rizeal và cộng sự đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm để xác định độ lệch hình dạng của các chi tiết được in bằng công nghệ in bồi đắp. Trong nghiên cứu này, độ dày lớp đã được xem xét. Tuy nhiên, vật liệu in là nhựa với phương pháp in mô hình lắng đọng nóng chảy [26]. Feng và cộng sự đã nghiên cứu độ lệch hình dạng của các kênh tròn bên trong nằm ngang được chế tạo bằng phương pháp nóng chảy bột laser với bột thép không gỉ 316 L. Với các giá trị công suất laser từ 60 W đến 100 W, tốc độ in từ 150 mm/giây đến 350 mm/giây, nghiên cứu cho thấy độ lệch hình dạng giảm khi công suất nguồn laser giảm và tốc độ in tăng [27]. Madaj và cộng sự đã tiến hành các thí nghiệm đối với các mẫu được in bằng phương pháp SLM sử dụng hợp kim AlSi10Mg. Máy SLM có công suất laser 200 W, tốc độ in 250 mm/giây để in lỗ đã được sử dụng, sau đó máy quét 3D FARO Quantum V2 FaroArm đã được sử dụng để đo độ lệch hình dạng. Kết quả thực nghiệm cho thấy độ lệch kích thước lớn nhất là

0.423 mm tương ứng với lỗ có đường kính 6 mm [28]. Bompos và cộng sự với mô phỏng và nghiên cứu thực nghiệm về quy trình in SLM với vật liệu thép 17-4PH, công suất nguồn laser 183 W và tốc độ in 1045 mm/giây cho thấy độ lệch kích thước không lớn hơn 10% [29]. Pal và cộng sự đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm về in SLM với bột Ti6Al4V trong đó công suất nguồn laser thay đổi từ 55 W đến 95 W, tốc độ in từ 150 mm/giây đến 1000 mm/giây và khoảng cách đường in từ 0.0495 mm đến 0.099 mm. Độ lệch kích thước tối đa là +2.09 mm. Độ chính xác kích thước tốt nhất đạt được ở tốc độ in cao nhất và công suất nguồn laser trung bình [30].

C. Herpel và cộng sự khẳng định chất lượng sản phẩm in 3D phụ thuộc vào bốn nhóm yếu tố bao gồm phương pháp in, độ chính xác của máy in, thông số quy trình in và vật liệu in trong bài báo “Accuracy of 3D printing compared with milling - A multi-center analysis of try-in dentures” [31]. Trong nội dung nghiên cứu của luận án, thông qua các thí nghiệm với phương pháp SLM và vật liệu bột Ti6Al4V, mối quan hệ giữa độ chính xác hình dạng hình học và các thông số in đã được thiết lập. Từ mô hình hồi quy thể hiện mối quan hệ này, một tập hợp các thông số công nghệ quá trình in để đảm bảo độ lệch hình dạng nhỏ nhất đã được xác định.

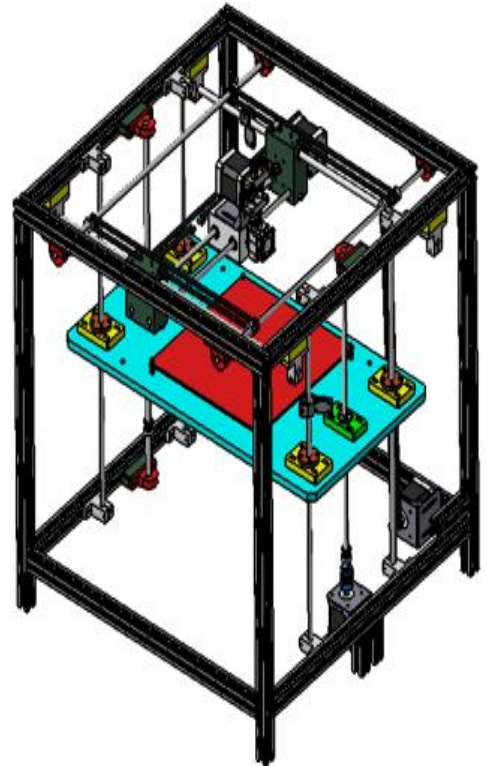
### **1.3. Tình hình nghiên cứu trong nước**

#### ***1.3.1. Tình hình nghiên cứu về sản xuất bồi đắp***

Theo báo cáo thống kê từ Trung tâm thông tin và thống kê khoa học và công nghệ thuộc Sở khoa học và công nghệ thành phố Hồ Chí Minh về tình hình nghiên cứu, ứng dụng công nghệ in 3D tại Việt Nam cho thấy các nghiên cứu tập trung vào [7]:

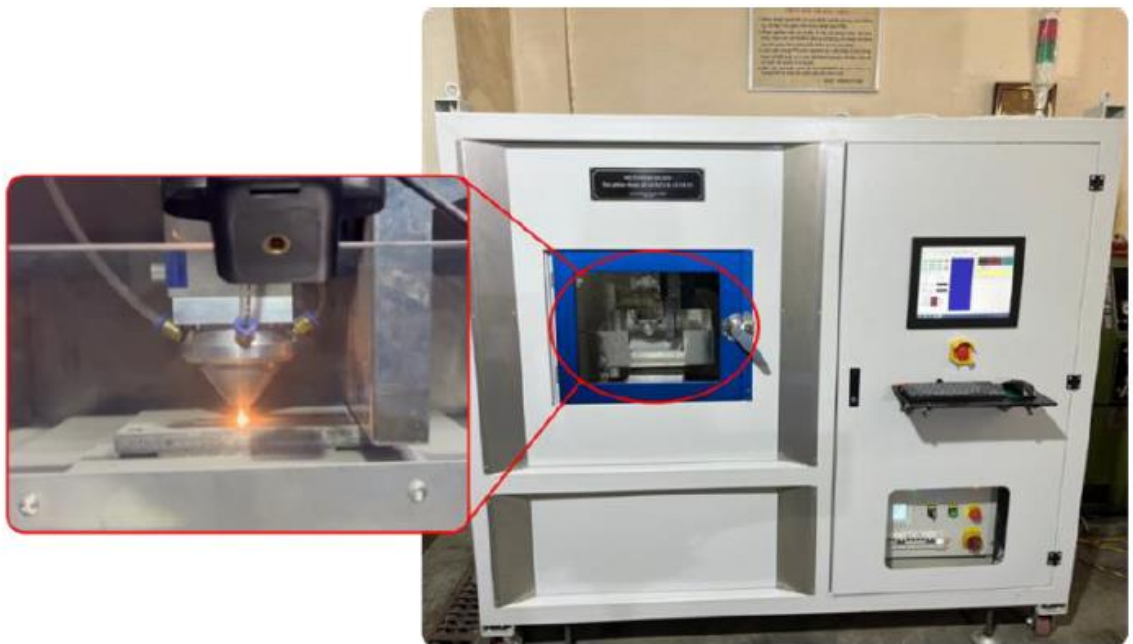
- ***Làm chủ công nghệ thiết kế, chế tạo máy in:***

Làm chủ công nghệ thiết kế, chế tạo máy in đã được nhiều nhóm nghiên cứu từ các Viện nghiên cứu, Trường Đại học, Doanh nghiệp tại Việt Nam quan tâm thực hiện. Nhiều kết quả nghiên cứu về thiết kế, chế tạo máy in 3D đã được công bố và ứng dụng trong thực tế phục vụ giảng dạy, nghiên cứu và sản xuất. Phần lớn là các nghiên cứu về thiết kế, chế tạo máy in để in các sản phẩm nhựa như máy in VINA FDM năm 2015 theo phương pháp in mô hình hóa bồi đắp lắng đọng, máy in FDM từ nhóm nghiên cứu của trường Đại học Giao thông vận tải – sản phẩm đề tài cấp Bộ B2016-GHA-06 như thể hiện ở Hình 1.14).



**Hình 1.14. Máy in FDM [32]**

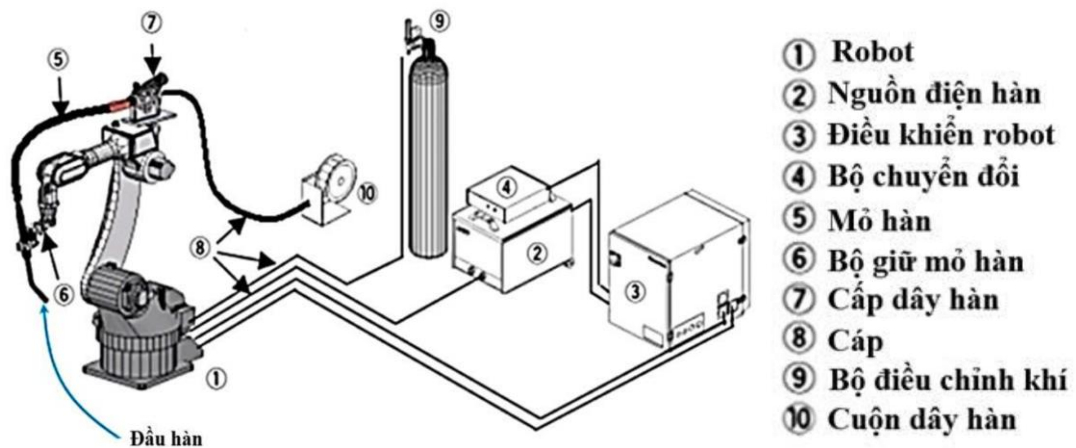
Nhóm nghiên cứu từ Học viện Kỹ thuật quân sự đã thiết kế, chế tạo thành công máy in 3D sử dụng vật liệu bột kim loại theo phương pháp in laser thiêu kết bột kim loại trực tiếp như thể hiện trên Hình 1.15.



**Hình 1.15. Máy in DLMD [33]**

- **Nghiên cứu ứng dụng công nghệ in 3D:**

Nghiên cứu ứng dụng hiệu quả công nghệ in 3D trong các lĩnh vực là rất cần thiết, đặc biệt với vật liệu kim loại. Nhóm nghiên cứu từ Học viện Kỹ thuật quân sự do TS. Lê Văn Thảo chủ trì đã thực hiện thành công đề tài nghiên cứu Nafosted: “Nghiên cứu sử dụng rô bốt hàn có khí bảo vệ để in 3D các chi tiết kim loại từ quan điểm công nghệ, kinh tế, và môi trường” [34]. Bên cạnh đó vào năm 2020, TS Lê Văn Thảo đã công bố nghiên cứu “A preliminary study on gas metal arc welding-based additive manufacturing of metal parts”. Nghiên cứu này đánh giá chất lượng luyện kim và cơ tính của chi tiết kim loại được chế tạo bằng công nghệ sản xuất bồi đắp dựa trên hàn hồ quang (GMAW-based AM) [35]. Hệ thống thiết bị in dựa trên GMAW được thể hiện ở Hình 1.16, trong đó sử dụng robot hàn.



**Hình 1.16. Thiết bị GMAW sử dụng robot [35]**

Thông qua thực nghiệm tạo hình một chi tiết thành mỏng bằng thép carbon thấp, kết quả phân tích cho thấy cấu trúc tế vi của sản phẩm có sự biến thiên theo chiều cao (từ trên xuống dưới), nhưng tổng thể vẫn đạt được các đặc tính cơ học (độ cứng, giới hạn chảy và độ bền kéo) tương đương với thép rèn truyền thống.

Ngoài ra, nghiên cứu “Đánh giá độ chính xác hình học và hiệu quả sử dụng vật liệu khi tạo hình chi tiết côn rỗng từ thép hợp kim độ bền cao bởi công nghệ WAAM” [36] của TS. Lê Văn Thảo và cộng sự tập trung vào việc ứng dụng công nghệ in 3D kim loại WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) để tạo hình các phôi chi tiết côn rỗng từ thép hợp kim độ bền cao. Điểm nổi bật của công trình này là việc chứng minh được tính khả thi của WAAM trong việc đảm bảo độ chính xác hình học cho

nguyên công tiếp theo, đồng thời làm nổi bật hiệu quả kinh tế vượt trội khi tiết kiệm đến 80% lượng vật liệu so với phương pháp cắt gọt truyền thống.

Nghiên cứu “Ảnh hưởng của vật liệu in đến đặc tính cơ ngót trong in 3D kim loại bằng công nghệ ép đùn vật liệu” [37] của PGS. TS. Nguyễn Văn Cường và cộng sự phân tích ảnh hưởng của vật liệu đến hiện tượng cơ ngót trong in 3D kim loại dạng ép đùn (MEX), tập trung vào độ ổn định hình dáng và mật độ cấu trúc sau thiêu kết. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở tối ưu hóa công thức vật liệu và hệ số bù trừ kích thước, nhằm nâng cao độ chính xác hình học của sản phẩm.

Đối với lĩnh vực y tế, nhiều bệnh viện lớn tại Thành phố Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh đã triển khai ứng dụng các sản phẩm từ in 3D vào phẫu thuật. Bệnh viện Chợ Rẫy, đã phẫu thuật thành công cho một trường hợp bệnh nhân bị mất một đoạn xương chày (do ung thư xương) bằng kỹ thuật "sử dụng mảnh ghép in 3D hợp kim Titanium dạng tổ ong để thay thế xương chày mất đoạn". Đây là trường hợp đầu tiên được sử dụng kỹ thuật này tại Việt Nam. Mảnh ghép Titanium được in ở nước ngoài. Mảnh ghép Titanium in 3D tổ ong là thiết kế đặc biệt, ngoài trọng lượng nhẹ hơn so với khối Titanium đặc, mảnh ghép dạng tổ ong sẽ giúp tế bào xương có thể "len lỏi" vào, sinh sôi, phát triển, về lâu dài sẽ biến mảnh ghép Titanium sẽ trở thành một phần của cơ thể, không bị thải loại ra ngoài [38]. Máy in 3D được đề xuất thiết kế, chế tạo cho phép in được dạng mảnh Titanium này. Tại Bệnh viện Đa khoa Tâm Anh [39]; Trung tâm Chấn thương chỉnh hình và Y học thể thao, Bệnh viện Đa khoa Quốc tế Vinmec [40] cũng đã sử dụng mảnh ghép Titanium in 3D trong phẫu thuật thay thế. Hình 1.17 thể hiện ứng dụng mảnh ghép trong phẫu thuật thay thế tại Bệnh viện Đa khoa Tâm Anh. Sự kết hợp của vật liệu kim loại Titan với công nghệ in 3D giúp cho các bệnh nhân bị tổn thương xương, khuyết xương, ung thư xương... được “hồi sinh” vận động thay vì phải chấp nhận tàn tật vĩnh viễn như trước đây. Sau ca phẫu thuật, bệnh nhân có thể tự vận động, tự đi lại mà không cần dùng tới nạng.



**Hình 1.17. Ứng dụng mảnh hợp kim Titanium in 3D  
tại Bệnh viện Đa khoa Tâm Anh [39]**

### **1.3.2. Tình hình nghiên cứu về in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc với vật liệu Ti6Al4V**

Năm 2018, PGS. TS Đặng Văn Nghìn và cộng sự đã khảo sát và giải bài toán tối ưu hóa các thông số công nghệ của quá trình in 3D kim loại SLM (Selective Laser Melting) [41]. Mục tiêu cốt lõi là tối đa hóa độ cứng tế vi (Vickers) của sản phẩm chế tạo từ vật liệu bột thép không gỉ 316L, với điều kiện ràng buộc là mật độ chi tiết phải đạt từ 99,3% trở lên. Kết quả giải bài toán tối ưu hóa đã xác định được bộ thông số công nghệ lý tưởng nhất là: Công suất laser 175W, tốc độ quét 200 mm/s, khoảng cách quét 0,04 mm và chiến lược quét chia vùng trung gian 5 mm. Khi vận hành máy SLM ở dải thông số này, chi tiết thép 316L đạt được độ cứng cực đại lên tới 228,3 HV.

Nhằm cải thiện các tính chất cơ lý của sản phẩm sau khi in với phương pháp in SLM cho vật liệu Ti6Al4V, một nghiên cứu tổng quan về xử lý nhiệt cho sản phẩm sau khi in ảnh hưởng như thế nào tới cơ tính và đặc điểm cấu trúc tế vi đã được thực hiện nhằm đánh giá các nghiên cứu hiện có [42,43]. Nguyen Minh Thuyet và cộng sự đã nghiên cứu tương tác khi in giữa tấm nền là vật liệu Ti với bột in là Ti6Al4V khi in theo phương pháp in SLS [44]. Nghiên cứu thực nghiệm về cơ tính và đặc điểm cấu trúc tế vi của sản phẩm khi in từ bột Ti6Al4V theo phương pháp in SLS cũng đã được Nguyen Minh Thuyet và cộng sự thực hiện [45].

Năm 2025, PGS. TS Trịnh Văn Trung và đồng nghiệp đã công bố một công trình nghiên cứu thực nghiệm nổi bật tại Việt Nam, tập trung đánh giá mối quan hệ giữa thông số công nghệ (công suất laser, tốc độ quét) và cấu trúc vi mô và tính chất cơ lý của hợp kim Ti64 [46]. Nghiên cứu được thực hiện với bộ thông số công nghệ cố định bao gồm: đường kính tiêu cự laser 180  $\mu\text{m}$ , khoảng cách đường quét 140  $\mu\text{m}$ , vận tốc quét 1600 mm/s, công suất laser 380 W, chiều dày lớp in 45  $\mu\text{m}$  và góc xoay giữa hai lớp in kế tiếp là  $45^\circ$ . Kết quả phân tích cho thấy tổ chức vi cấu trúc của mẫu in bao gồm chủ yếu là pha  $\alpha/\alpha'$ . Về mặt cơ tính, mẫu đạt độ cứng trung bình 343 HV, mô-đun đàn hồi 24,34 GPa, giới hạn chảy 93,5 MPa, giới hạn bền kéo 1049,4 MPa và độ giãn dài 12,8%. Tuy nhiên, đánh giá tổng thể cho thấy chất lượng mẫu in chưa đạt mức lý tưởng do bề mặt có độ nhám cao và vẫn tồn tại nhiều khuyết tật rỗ xốp, dẫn đến cơ tính tổng hợp thấp hơn so với hợp kim chế tạo bằng phương pháp truyền thống.

#### **Nhận xét và đánh giá:**

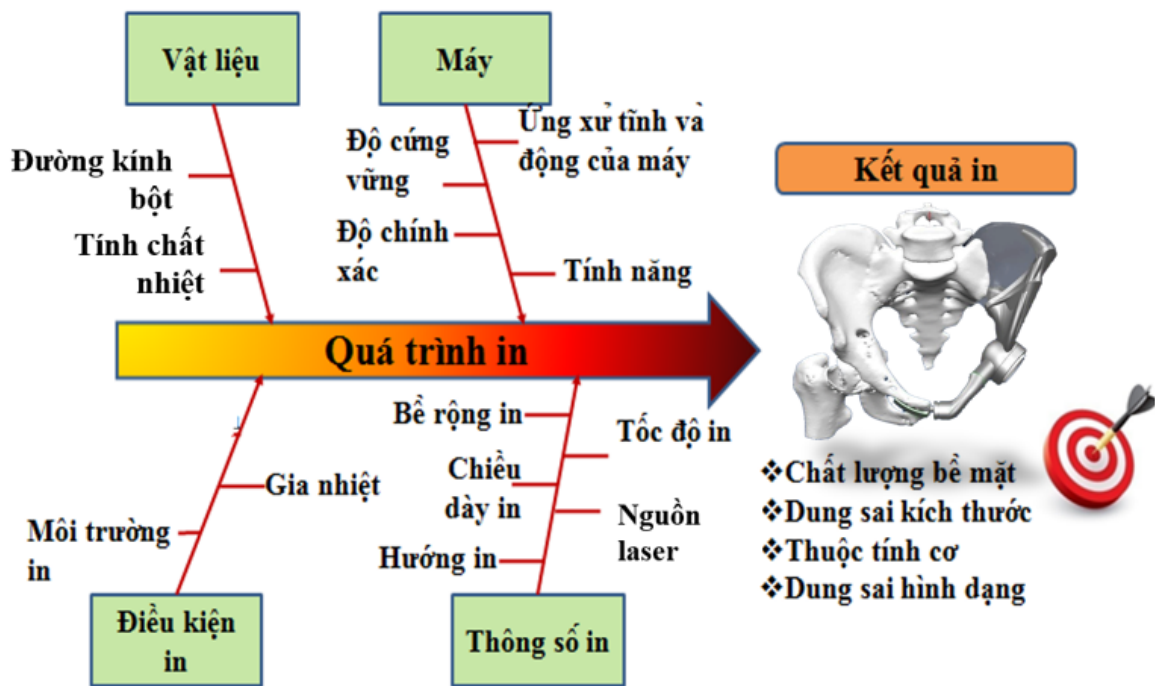
- Từ tổng quan về tình hình nghiên cứu trên thế giới và trong nước nêu trên nhận thấy rằng, vật liệu Ti6Al4V trong sản xuất bồi đắp được chú trọng nghiên cứu nhằm tạo ra các sản phẩm chất lượng cao, đặc biệt áp dụng trong lĩnh vực công nghiệp đặc thù, y tế.

- Song nghiên cứu về chế độ in theo phương pháp nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc cho bột kim loại Ti6Al4V với nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của các thông số công nghệ in gồm công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t) tới chỉ tiêu chất lượng sản phẩm in như độ sai lệch hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và đặc điểm cấu trúc tế vi vẫn còn ít được tập trung nghiên cứu.

#### **1.4. Chất lượng sản phẩm trong sản xuất bồi đắp**

Quá trình in 3D nói chung và SLM nói riêng cần xét tới các thông số ảnh hưởng tới chất lượng in. Chất lượng in được xét bao gồm nhám bề mặt, sai lệch về kích thước và hình dáng hình học, các thuộc tính cơ khí.

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng tới chất lượng in bao gồm tính chất vật liệu, máy, điều kiện in, chế độ in như thể hiện trên hình 1.18. Việc xác định hợp lý các thông số chế độ in như tốc độ in, kiểu điền đầy, chiều dày in rất quan trọng, ảnh hưởng quyết định tới chất lượng sản phẩm đặc biệt là độ chính xác về kích thước.



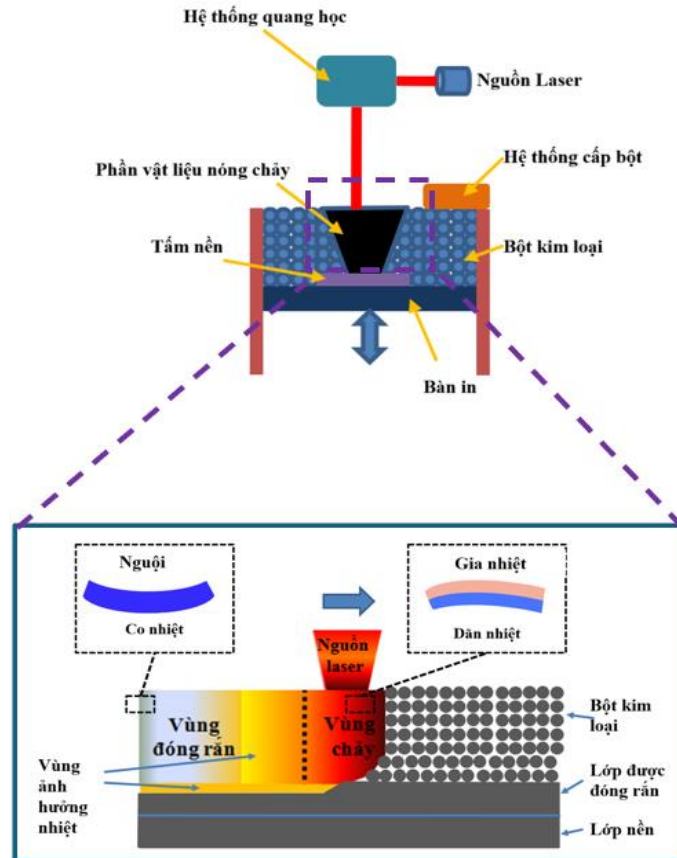
**Hình 1.18. Các thông số ảnh hưởng tới chất lượng in bột**

Xác định chính xác nhiệt độ trong quá trình in rất quan trọng đối với sản xuất bồi đắp. Nhiệt độ quá nhỏ hay quá lớn đều ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Để đảm bảo chất lượng sản phẩm in, nhiệt độ trong quá trình in phải lớn hơn nhiệt độ chảy của vật liệu in. Nghiên cứu này xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới phân bố nhiệt độ khi in vật liệu bột Ti6Al4V theo phương pháp in nóng chảy laser chọn lọc (SLM). Các thông số công nghệ in SLM bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in. Kết quả nghiên cứu cho phép xác định bộ thông số công nghệ hợp lý khi in trên máy in 3D.

Trong nội dung luận án, với mục đích xác định ảnh hưởng của chế độ công nghệ in như nguồn laser, tốc độ in, chiều dày lớp in tới độ chính xác về kích thước của sản phẩm in, chất lượng bề mặt, cấu trúc tế vi của sản phẩm in, các nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm đã được thực hiện. Một số kết quả đã thực hiện với quá trình WAMM và quá trình SLM.

### **1.5. Phương pháp in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc**

Trong công nghệ AM, có nhiều phương pháp in đã và đang được áp dụng. Phương pháp in nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc (SLM) là một trong những phương pháp in được dùng để tạo sản phẩm từ bột kim loại như Rasiya G. và cộng sự đã nghiên cứu trong “Additive Manufacturing-A Review” [47].



**Hình 1.19. Cơ chế in SLM [48]**

Hình 1.19 thể hiện cơ chế in SLM. Fu C.H và đồng nghiệp đã nghiên cứu cơ chế in SLM qua bài “3-Dimensional finite element modeling of selective laser melting Ti-6Al-4V alloy” [48]. Ban đầu lớp bột kim loại được rải trên tấm nền, nguồn laser thông qua hệ thống quang học làm nóng chảy lớp bột và hình thành lớp in đầu tiên. Để in lớp thứ hai, bàn in được dịch chuyển xuống theo phương thẳng đứng một lượng bằng chiều dày lớp in. Hệ thống cấp bột rải lớp bột mới lên lớp vừa in. Sau đó lớp bột này được làm nóng chảy bởi năng lượng laser để hình thành lớp thứ hai. Quá trình này được lặp lại đến hết chiều cao của chi tiết cần in. Để đảm bảo được các yêu cầu làm việc, chi tiết in phải thỏa mãn các yêu cầu về độ chính xác kích thước, độ chính xác hình dạng, chất lượng bề mặt và các thuộc tính cơ khí. Tuy vậy, cơ chế in phức tạp với sự thay đổi trạng thái của vật liệu từ rắn (trạng thái ban đầu) đến lỏng (giai đoạn nóng chảy) và cuối cùng là trạng thái rắn (sau khi in xong), thời gian chuyển trạng thái ngắn dẫn đến ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Chính vì vậy, nghiên cứu nhằm nâng cao chất lượng và năng suất sản phẩm luôn được các nhà nghiên cứu, đơn vị ứng dụng quan tâm.

### **1.6 Đề xuất các thông số nghiên cứu trong luận án**

Từ luận giải nêu trên đề xuất các thông số nghiên cứu như sau:

- 3 tham số đầu vào bao gồm công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t)
- 3 tham số chỉ tiêu chất lượng: độ chính xác hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và độ xốp của sản phẩm.

### **1.7 Nhiệm vụ nghiên cứu của đề tài luận án**

Từ nội dung phân tích nêu trên xác định nhiệm vụ chính cần nghiên cứu của luận án như sau:

- Nghiên cứu ảnh hưởng của 3 tham số đầu vào bao gồm: công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t) tới độ chính xác hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và độ xốp khi in 3D kim loại;
- Thực nghiệm kiểm chứng để xác định các giá trị của các tham số gồm:
  - + Công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t);
  - + Độ chính xác hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và độ xốp khi in 3D kim loại

## KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Từ nghiên cứu tổng quan về sản xuất bồi đắp và phương pháp in SLM với bột Ti6Al4V, một số kết luận như sau:

Chất lượng sản phẩm in 3D bằng công nghệ SLM chịu tác động tổng hợp bởi bốn nhóm yếu tố phức tạp liên quan đến thiết bị, vật liệu, chế độ công nghệ và điều kiện xử lý. Nhằm khắc phục hạn chế của các công trình đi trước (thường chỉ khảo sát trên một chiều dày lớp in cố định), nghiên cứu này đã tiến hành đánh giá sự ảnh hưởng đồng thời của ba thông số công nghệ cốt lõi: công suất laser, vận tốc in và chiều dày lớp. Cách tiếp cận này cho phép làm rõ quy luật tác động của chế độ in đến sai lệch hình dạng, độ nhám bề mặt và cấu trúc tế vi của hợp kim Ti6Al4V, qua đó cung cấp cơ sở khoa học vững chắc để xác định bộ thông số tối ưu nhằm cân bằng giữa yêu cầu về năng suất và chất lượng trong thực tiễn sản xuất.

## **CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT QUÁ TRÌNH IN 3D KIM LOẠI BẰNG PHƯƠNG PHÁP IN SLM**

Từ nghiên cứu tổng quan ta nhận thấy rằng vấn đề chất lượng rất quan trọng với sản xuất bồi đắp, tăng khả năng ứng dụng của công nghệ này trong thực tiễn. Chất lượng sản phẩm in được đánh giá thông qua một số chỉ tiêu chính như chất lượng bề mặt, độ chính xác hình dáng hình học, tính chất cơ học. Để nâng cao chất lượng sản phẩm cần hiểu rõ cơ chế in, mô hình chuyển pha của vật liệu khi in, các thông số công nghệ in. Từ đó, thông qua mô phỏng để xác định bộ thông số công nghệ với trạng thái chuyển pha của vật liệu. Những vấn đề này sẽ được đề cập cụ thể trong phần sau.

### **2.1. Chất lượng sản phẩm in**

In 3D là công nghệ cho phép tạo ra các sản phẩm phức tạp từ nhiều vật liệu khác nhau và phù hợp với sản xuất định hướng khách hàng. Chất lượng là yếu tố then chốt trong sản xuất chế tạo. Nhiều lĩnh vực như hàng không vũ trụ và ô tô đòi hỏi chế tạo các chi tiết máy phải đáp ứng các tiêu chuẩn cao và chất lượng của chi tiết đồng nhất. Với việc sản xuất bồi đắp ngày càng được sử dụng nhiều hơn trong các ứng dụng công nghiệp, do đó, đảm bảo chất lượng (QA) trở thành một trong những chủ đề quan trọng nhất. Nhưng làm thế nào để đảm bảo rằng các sản phẩm in 3D đáp ứng các tiêu chuẩn chất lượng mà khách hàng mong đợi và yêu cầu.

Chất lượng sản phẩm in được đánh giá thông qua:

- 1- Độ chính xác về hình dạng.
- 2- Chất lượng bề mặt.
- 3- Tính chất cơ học.
- 4- Tính thẩm mỹ.
- 5- Hiệu suất chức năng.
- 6- Tuân thủ các tiêu chuẩn và an toàn.

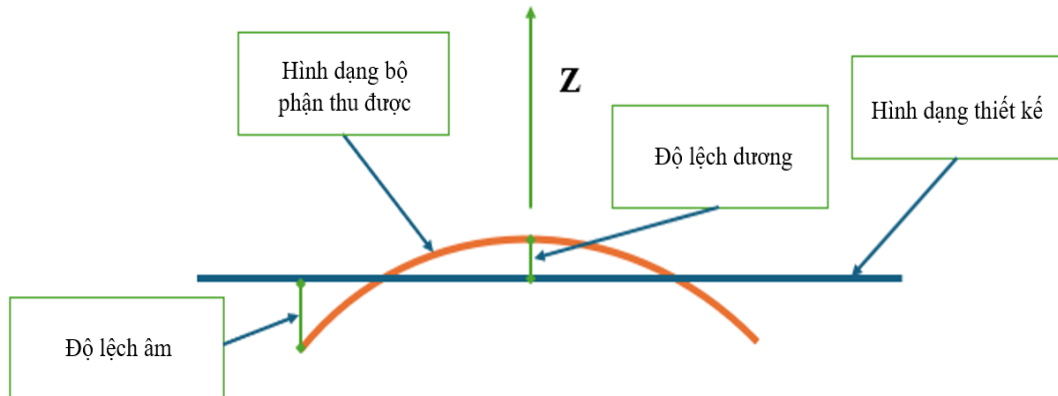
Chất lượng sản phẩm in phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó có các yếu tố ảnh hưởng chính như phương pháp in, vật liệu in và chế độ công nghệ in.

Trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh tập trung vào độ chính xác về hình dạng, chất lượng bề mặt và tính chất cơ học.

### 2.1.1. Độ chính xác về hình dạng

Một trong những tiêu chuẩn chất lượng quan trọng nhất đối với các sản phẩm in 3D là độ chính xác về kích thước, hình dạng của sản phẩm tức là mức độ phù hợp giữa kích thước, hình dạng vật lý của sản phẩm in được với thông số kích thước, hình dạng thiết kế. Độ sai lệch về hình dạng bao gồm độ lệch dương và độ lệch âm là sự khác biệt giữa hình dạng chi tiết mong muốn và hình dạng chi tiết thu được như thể hiện trong Hình 2.1.

Độ sai lệch hình dạng của sản phẩm in là do tác động của năng lượng nhiệt trong quá trình thiêu kết bột kim loại và quá trình chuyển pha nhanh từ rắn sang lỏng và ngược lại. Mặt khác, độ sai lệch hình dạng cũng bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như cài đặt máy in, đặc tính vật liệu, điều kiện môi trường và kỹ thuật xử lý sau in.



**Hình 2.1. Định nghĩa về độ sai lệch hình dạng**

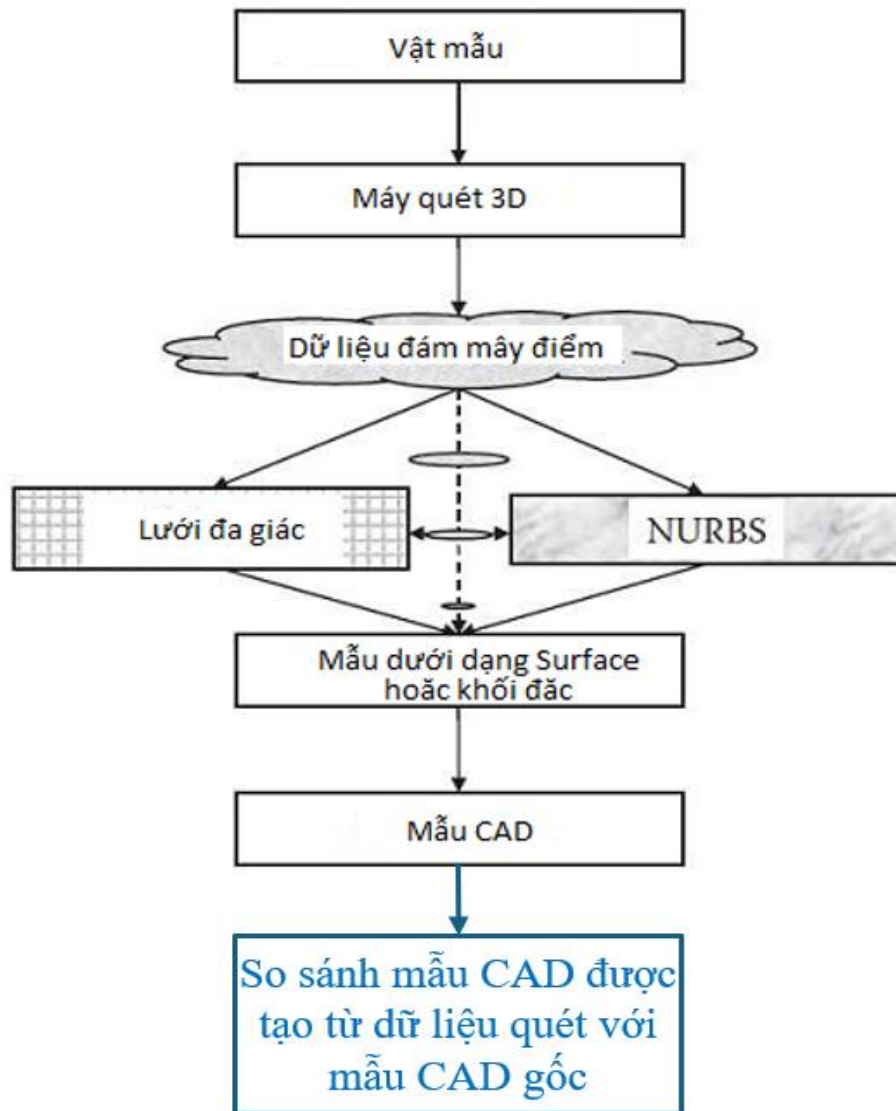
Để xác định độ sai lệch hình dạng, Bảng 2.1 thể hiện một số phương pháp và thiết bị tương ứng.

**Bảng 2.1. Các phương pháp xác định độ sai lệch hình dạng và ứng dụng của chúng**

Phương pháp	Thiết bị	Độ chính xác	Ứng dụng
Đo tiếp xúc sử dụng dụng cụ đo	Thước cặp, đồng hồ so	Vài $\mu\text{m}$ – 0.1 mm	Đo cơ bản
Đo tiếp xúc sử dụng máy chuyên dụng	Máy đo độ tròn, máy đo biên dạng, máy CMM	$\mu\text{m}$ – nm	Đo chính xác
Đo không tiếp xúc (Quang học/laser)	Máy scan 3D	nm – $\mu\text{m}$	Phân tích chi tiết về sai lệch hình dạng

Ngày nay, với sự phát triển của công nghệ, các máy quét 3D được sử dụng nhiều trong đánh giá độ chính xác hình dạng của sản phẩm. Quy trình đánh giá độ chính xác hình dạng của sản phẩm in được thể hiện trên Hình 2.2.

Với các bước bao gồm từ mẫu in sử dụng máy quét 3D để quét mẫu in, dữ liệu thu được là đám mây điểm. Sau đó dữ liệu này được xử lý sử dụng phần mềm chuyên dụng để tạo bề mặt dạng lưới hoặc dạng NURBS, từ các bề mặt này để tạo dạng khối rắn của mẫu in. Kết quả mẫu CAD được xây dựng sẽ được so sánh với mẫu CAD gốc (file CAD thiết kế trước khi in của sản phẩm) nhằm phân tích các sai lệch kích thước.

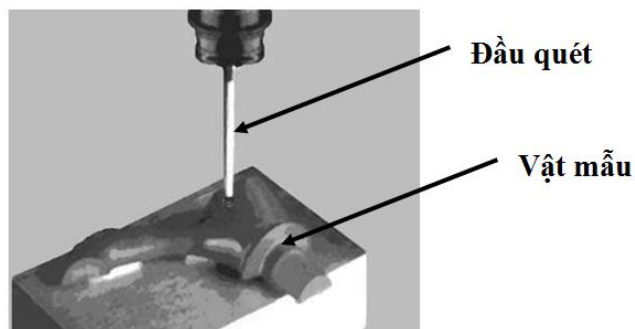


**Hình 2.2. Các bước đánh giá sai lệch hình dạng sử dụng phương pháp quét mẫu [49]**

### Các phương pháp thu nhận dữ liệu từ mô hình thực:

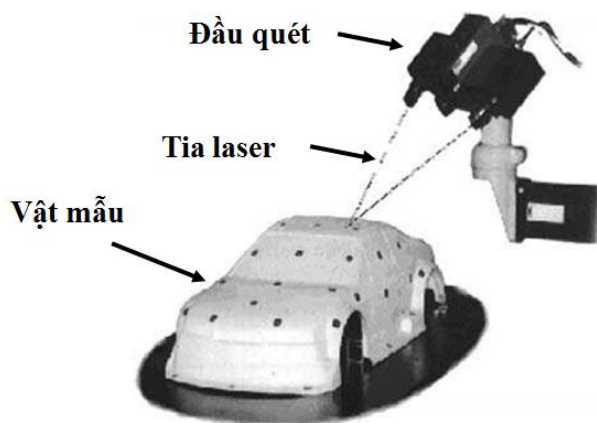
#### - Phương pháp tiếp xúc

Với thiết bị thu nhận dữ liệu theo phương pháp tiếp xúc, các đầu dò chuyển động theo các đường biên dạng của mẫu sản phẩm. Các máy CMM (Coordinate Measuring Machine) sử dụng phương pháp đo tiếp xúc trong tạo dữ liệu với dung sai đạt được 0.01 đến 0.02 mm. Tuy nhiên, phụ thuộc vào kích cỡ của chi tiết được quét, phương pháp này thường mất nhiều thời gian do mỗi điểm dữ liệu được sinh ra tuần tự khi đỉnh đầu dò tiếp xúc với bề mặt chi tiết. Mặt khác trong quá trình đo luôn duy trì áp lực nhất định để giữ sự tiếp xúc của đầu đo với bề mặt chi tiết điều này làm mòn đầu đo, ảnh hưởng đến độ chính xác của dữ liệu quét.



**Hình 2.3. Phương pháp tiếp xúc để thu nhận dữ liệu [50]**

#### - Phương pháp không tiếp xúc



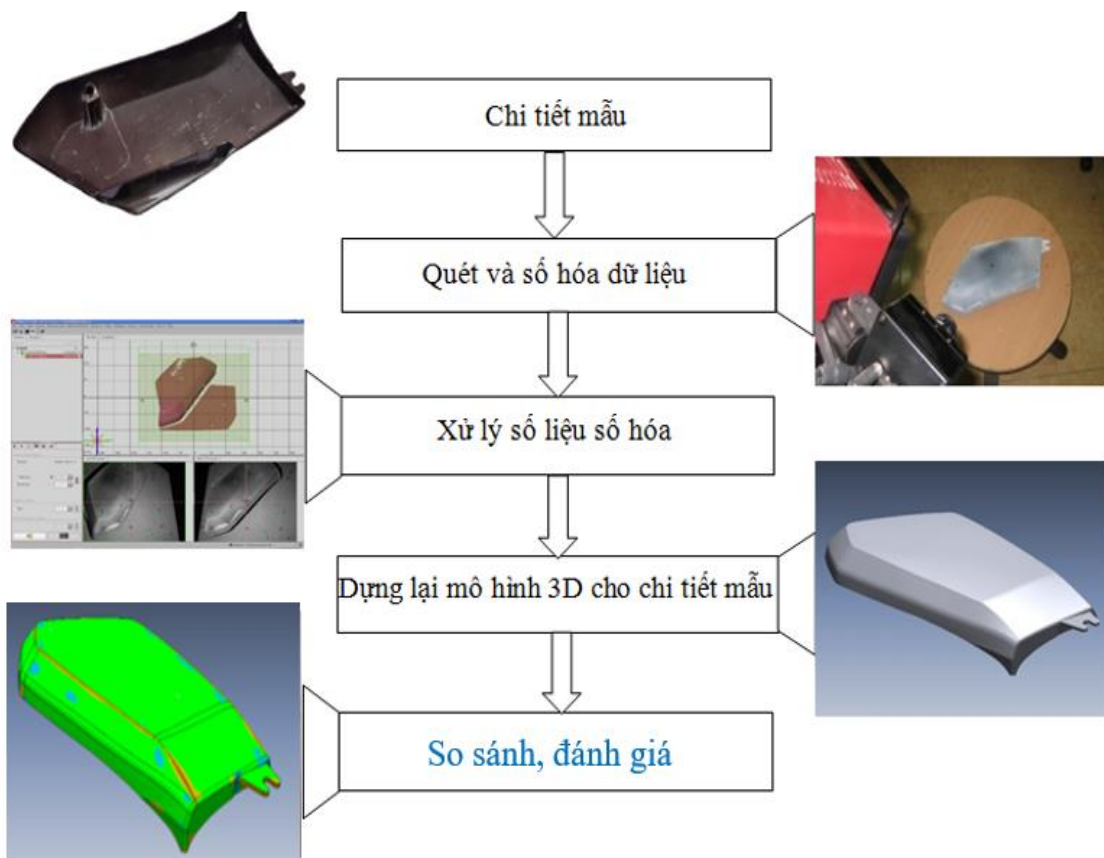
**Hình 2.4. Phương pháp không tiếp xúc để thu nhận dữ liệu [50]**

Phương pháp thu nhận dữ liệu này hiện tại được sử dụng phổ biến. Các thiết bị quét sử dụng tia laser để thu nhận lượng lớn dữ liệu các điểm trong thời gian ngắn với sai lệch cho phép 0.025 đến 0.2 mm.

Để thể hiện rõ hơn về quy trình quét trên, ví dụ về các bước quét một chi tiết trên xe máy được thể hiện trên Từ một đối tượng đã có sẵn được coi là chi tiết mẫu hay mẫu thử nghiệm. Để dựng lại mô hình 3D của chi tiết áp dụng công quét phải trải qua các bước sau đây: Chi tiết mẫu, quét mẫu và số hóa dữ liệu, xử lý số liệu số hóa, dựng lại mô hình 3D cho chi tiết, so sánh mẫu quét và mẫu gốc, đánh giá sai số. Các bước áp dụng phương pháp quét mẫu cho chi tiết cốp xe máy của xe Honda Dream được thể hiện ở Hình 2.5.

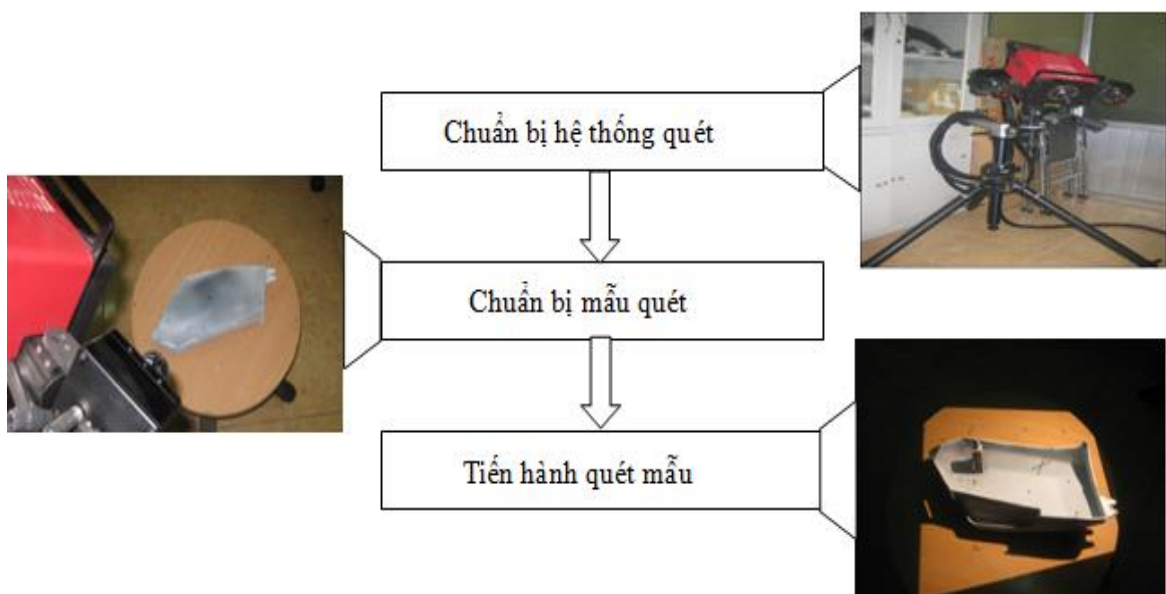
*- Quét và số hóa dữ liệu*

Để số hóa sản phẩm ta dùng các máy quét hình để quét hình dạng vật thể. Dựa theo cách thức quét hình người ta phân ra hai dạng thiết bị quét hình chủ yếu là các máy quét dạng tiếp xúc (CMM) và các máy quét không tiếp xúc (máy quét laser). Các máy CMM sử dụng các đầu đo để tiếp xúc với bề mặt cần đo. Một số vị trí tiếp xúc sẽ cho một điểm có tọa độ (x, y, z).



**Hình 2.5. Quy trình đánh giá mẫu in theo phương pháp quét 3D [51]**

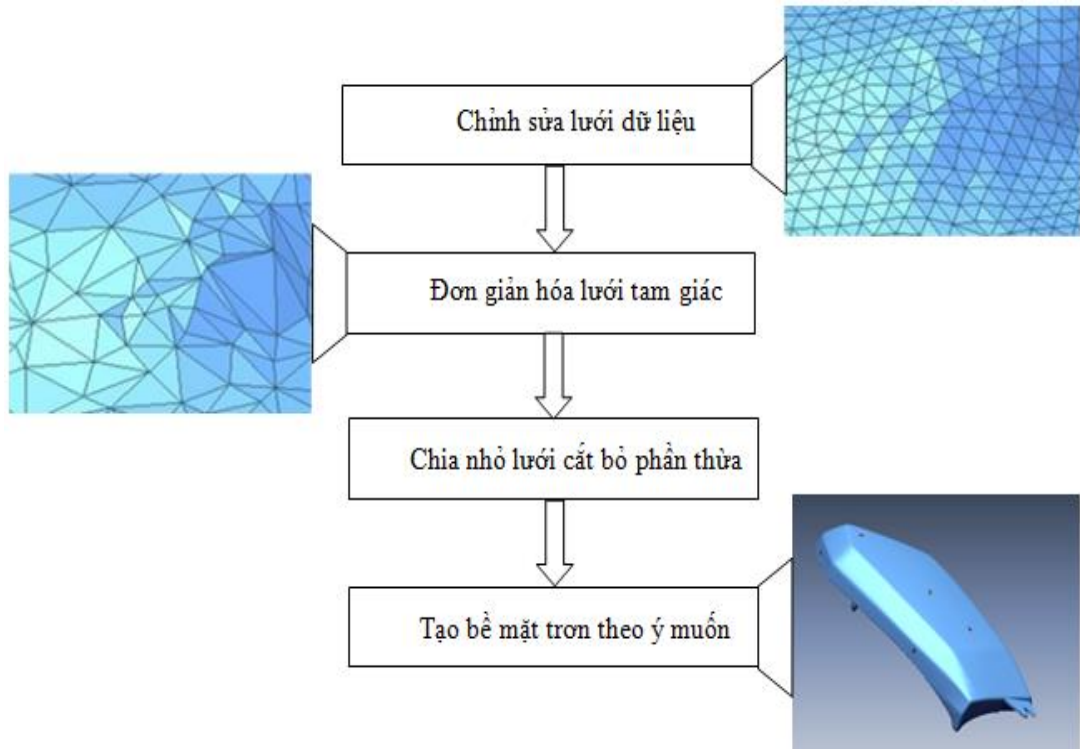
Tập hợp các điểm này sẽ tạo thành các lưới điểm vẽ trên hình dáng vật thể. Còn các máy quét laser thì sử dụng chùm tia laser phát ra từ máy chiếu vào vật thể. Các tia này sẽ phản xạ trở lại cảm biến thu. Máy tập hợp các tia phản xạ này để dựng lên ảnh của vật thể. Hình dạng của toàn bộ vật thể được ghi lại bằng cách dịch chuyển hay quay vật thể trong chùm ánh sáng hoặc quét chùm ánh sáng ngang qua vật thể. Phương pháp này có độ chính xác kém hơn phương pháp tiếp xúc song nhanh hơn và đầy đủ hơn. Dữ liệu thu được không phải là lưới điểm mà là tập hợp vô vàn các khối ảnh điểm (đám mây điểm). Đám mây điểm này sẽ chuyển sang lưới tam giác dùng để xây dựng các bề mặt. Các bước của quá trình quét và số hóa dữ liệu sử dụng máy quét laser được thể hiện ở Hình 2.6.



**Hình 2.6. Quy trình quét mẫu [51]**

### *Xử lý số liệu số hóa*

Các bước của quá trình xử lý dữ liệu số hóa bao gồm: Chính sửa dữ liệu, đơn giản hóa lưới tam giác, chia nhỏ lưới cắt bỏ phần thừa và cuối cùng tạo bề mặt trơn. Kết quả của các bước được thể hiện ở Hình 2.7.



**Hình 2.7. Quy trình số hóa [51]**

#### *Dựng lại mô hình 3D cho chi tiết mẫu*

Trên cơ sở dữ liệu số hóa đã xử lý ta dựng lại mô hình 3D cho sản phẩm dạng khối hoặc dạng bề mặt bằng phần mềm RapidForm™. Kết quả cuối cùng ta nhận được một bề mặt trơn và được chuyển vào tệp dữ liệu với một trong các định dạng: IGS (Initial Graphics Exchange Specification) hoặc STL (STereoLithography).

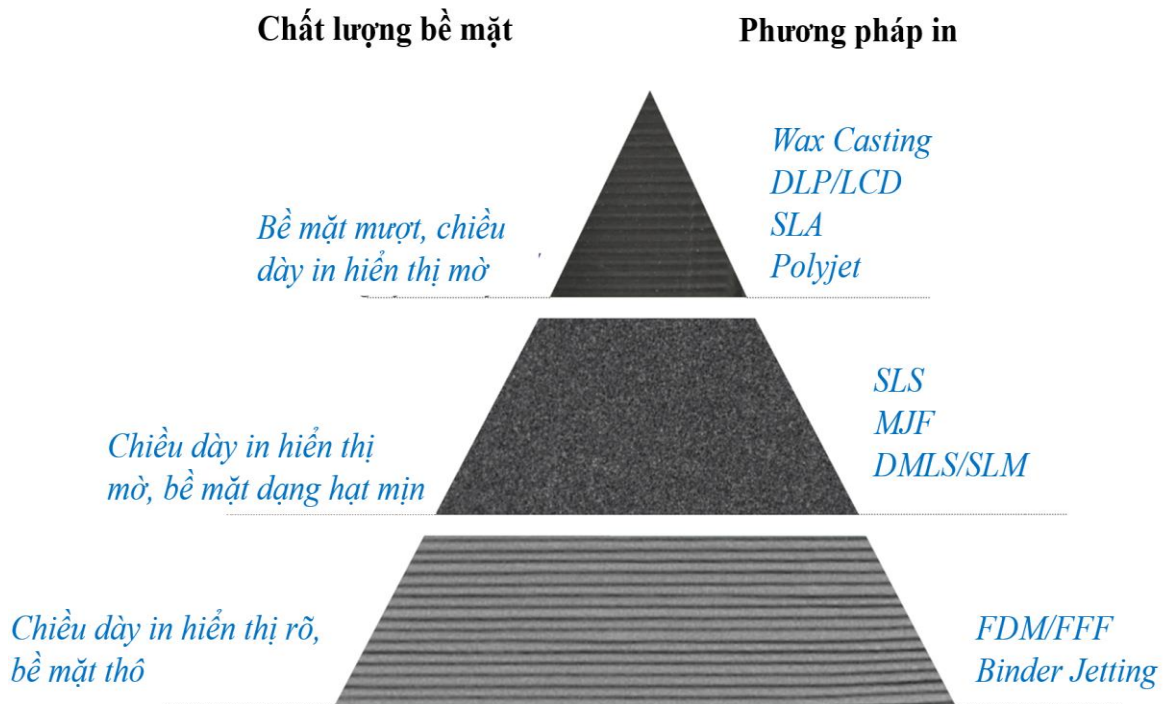
*So sánh, đánh giá sai lệch hình dạng giữa mẫu quét và mẫu gốc.*

Từ mô hình 3D dựng lại được bằng phương pháp quét, phần mềm CAE cho phép thể hiện sự sai lệch kích thước giữa mẫu quét và mẫu gốc ban đầu.

#### **2.1.2. Chất lượng bề mặt**

Một tiêu chuẩn chất lượng quan trọng khác đối với các sản phẩm in 3D là chất lượng bề mặt, tức là độ mịn, độ nhám hoặc kết cấu của bề mặt sản phẩm. Chất lượng bề mặt bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như phương pháp in, chiều cao lớp in, kích thước vòi phun, tốc độ in và các kỹ thuật xử lý sau in.

Hình 2.8 thể hiện chất lượng bề mặt đạt được với các phương pháp in Wax Casting, DLP/LCD, SLA, Polyjet; FDM/FFF, Binder Jetting; và SLS, MJF, DMLS/SLM.



**Hình 2.8. Chất lượng bề mặt đạt được với các phương pháp in [52]**

### 2.1.3. Tính chất cơ học

Một tiêu chuẩn chất lượng quan trọng thứ ba đối với các sản phẩm in 3D là tính chất cơ học như độ bền, độ cứng, độ xốp, độ bền mỏi của sản phẩm. Tính chất cơ học được xác định bởi các yếu tố như thành phần vật liệu, phương pháp in, hướng in, mật độ lấp đầy và các kỹ thuật xử lý sau in. Để đo các đặc tính cơ học, ta có thể sử dụng các công cụ như máy kiểm tra độ bền kéo, máy kiểm tra độ bền nén hoặc máy kiểm tra độ bền mỏi và so sánh kết quả với thông số kỹ thuật thiết kế. Để cải thiện các đặc tính cơ học, ta có thể chọn đúng vật liệu cho ứng dụng, sử dụng phương pháp in phù hợp, tối ưu hóa thông số công nghệ in và áp dụng các phương pháp xử lý sau in phù hợp.

## 2.2. Mô hình chuyển pha của vật liệu kim loại khi in

Trong quá trình in 3D, từ phân tích các chỉ tiêu về chất lượng của sản phẩm nêu trên, phương pháp in, vật liệu in có vai trò quan trọng trong quyết định tới chất lượng sản phẩm. Đối với vật liệu in, trong quá trình in các thuộc tính nhiệt của vật liệu, sự chuyển đổi pha của vật liệu rất phức tạp, ảnh hưởng lớn tới chất lượng sản

phẩm in. Vì vậy cần hiểu rõ về mô hình chuyển pha của vật liệu cũng như sự thay đổi của các đặc trưng nhiệt của vật liệu trong quá trình in.

Hình 2.9 cho thấy sự thay đổi pha theo các thông số nhiệt độ của hợp kim Ti6Al4V từ rắn, lỏng tới bay hơi. Từ sơ đồ chuyển đổi trạng thái của vật liệu nhận thấy rằng, các thông số công nghệ in cần tạo ra được nhiệt độ khi in lớn hơn 1268 K mới đảm bảo quá trình tạo lớp in.

Sau khi in một lớp, trạng thái của vật liệu thay đổi từ rắn, lỏng rồi rắn. Trong giai đoạn nguội nhanh (vật liệu ở trạng thái lỏng về lại trạng thái rắn), nhiệt độ của hợp kim Ti6Al4V từ 1268 K đến 1877 K là vùng ảnh hưởng nhiệt HTEZ, tồn tại ứng suất dư do nhiệt (thể hiện bởi chiều dài  $x$  trên Hình 2.9).

Chiều dài vùng ảnh hưởng nhiệt được xác định như sau [53]:

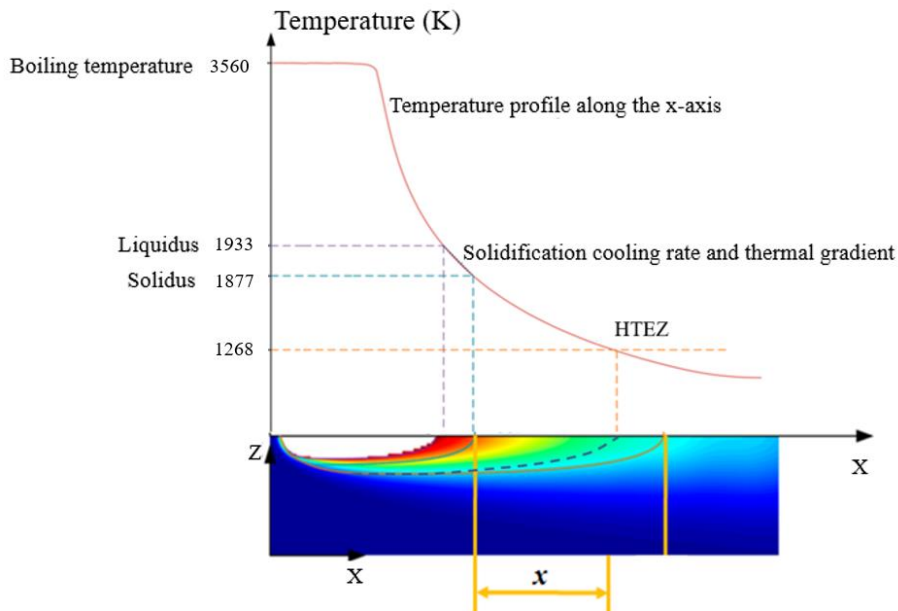
$$x = 1.22\sqrt{\gamma \cdot t'} \quad (2.1)$$

$\gamma$  là hệ số khuếch tán nhiệt; và  $t'$  là thời gian tương tác laser.

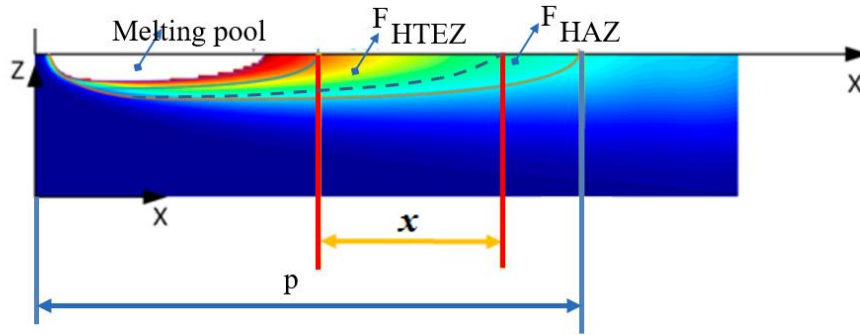
Giữa hệ số khuếch tán nhiệt và hệ số dẫn nhiệt có mối quan hệ sau [53]:

$$\gamma = \lambda \cdot \rho \cdot C \quad (2.2)$$

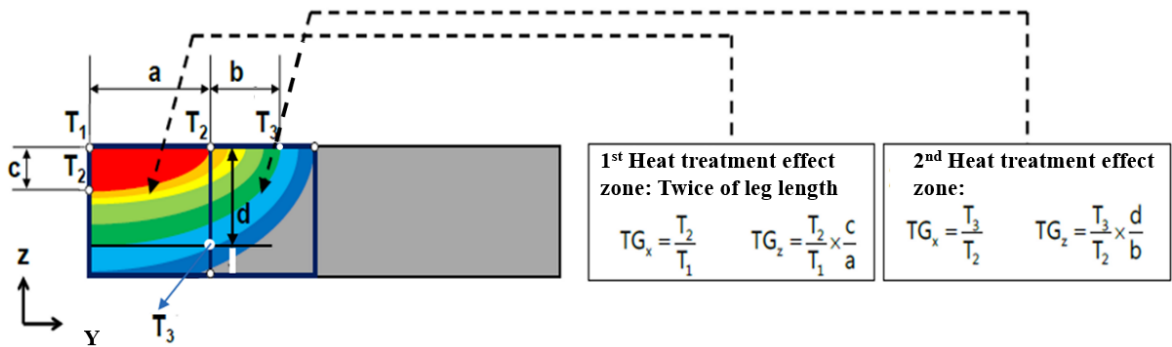
Trong đó  $\lambda$  là hệ số dẫn nhiệt (J/(m s K)),  $\rho$  là khối lượng riêng của vật liệu ( $\text{kg/m}^3$ ), và  $C$  là nhiệt dung riêng (J/(kg K)).



**Hình 2.9. Sơ đồ chuyển pha của vật liệu Ti6Al4V và xác định chiều dài của HTEZ**



Hình 2.10. Tính toán bề mặt vùng ảnh hưởng nhiệt (HTEZ).



Hình 2.11. Định nghĩa của TG trong mô hình phân tích nhiệt [54].

Hình 2.11 giải thích cách áp dụng gradient nhiệt độ (TG) vào một mô hình phân tích in thực tế. Mô hình phân tích in được chia thành hai vùng, vùng ảnh hưởng xử lý nhiệt thứ nhất và thứ hai, tùy thuộc vào mức độ biến thiên nhiệt độ. Sau đó, TG được xác định bằng gradient nhiệt độ trung bình của mỗi vùng.

Mối quan hệ giữa TG với đặc tính vật liệu được xác định như sau [55]:

$$\Delta TG = |TG_{2nd\ HTEZ} - TG_{1st\ HTEZ}| = \frac{\rho \cdot m}{\alpha} \tag{2.3}$$

Trong đó  $\rho$  là mật độ của vật liệu,  $m$  là tham số mạng tinh thể, và  $\alpha$  là hệ số giãn nở nhiệt. Với  $T = 1173\ K$ , giá trị  $m$  là  $3.63 \cdot 10^{-7}\ (mm)$  [56]. Phương trình để tính toán khối lượng riêng của vật liệu dựa trên gradient nhiệt độ, tham số mạng tinh thể, và hệ số giãn nở nhiệt:

$$\rho = \frac{\Delta TG \cdot \alpha}{m} \tag{2.4}$$

Từ đó, chiều dài vùng ảnh hưởng nhiệt được xác định như sau:

$$x = 1.22\sqrt{\gamma \cdot t} = 1.22\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C \cdot t} = 1.22\sqrt{\lambda \cdot \frac{\Delta TG \cdot \alpha}{m} \cdot C \cdot t} \tag{2.5}$$

Để xác định chính xác các đặc tính nhiệt-cơ học của các chi tiết được in, sự thay đổi pha của vật liệu trong quá trình in SLM, cũng như các đặc tính phụ thuộc nhiệt độ của vật liệu phải được xem xét. Trong quá trình gia nhiệt, sự thay đổi pha là từ rắn (bột kim loại) sang lỏng (bột nóng chảy), và từ lỏng sang khí (bay hơi) trong trường hợp nhiệt độ cao hơn nhiệt độ sôi. Trong quá trình làm nguội, sự thay đổi pha là từ lỏng sang rắn để có chi tiết được in. Với sự thay đổi pha của vật liệu, các giá trị của  $k$  (hệ số dẫn nhiệt),  $C$  (nhiệt dung riêng), và  $\rho$  (khối lượng riêng) cũng thay đổi, và được tính toán như sau [57]:

$$k = \theta k_{rắn \rightarrow lỏng} + (1 - \theta) k_{lỏng \rightarrow khí} \quad (2.6)$$

$$C = \theta C_{rắn \rightarrow lỏng} + (1 - \theta) C_{lỏng \rightarrow khí} \quad (2.7)$$

$$\rho = \frac{\theta \rho_{rắn \rightarrow lỏng} C_{rắn \rightarrow lỏng} + (1 - \theta) \rho_{lỏng \rightarrow khí} C_{lỏng \rightarrow khí}}{\theta C_{rắn \rightarrow lỏng} + (1 - \theta) C_{lỏng \rightarrow khí}} \quad (2.8)$$

Trong đó  $\theta$  là hàm lượng thể tích nằm trong khoảng từ 0 đến 1 trong khoảng chuyển tiếp. Giả sử nhiệt độ nằm trong khoảng từ nhiệt độ thiêu kết ( $T_s$ ) đến nhiệt độ nóng chảy ( $T_m$ ), các giá trị của  $k$ ,  $C$ , và  $\rho$  được xác định mà không có pha chuyển từ lỏng sang khí.

$$k_{rắn \rightarrow lỏng} = \frac{k_{nguyên khối} - k_{bột}}{T_m - T_s} (T - T_s) + k_{bột} \quad (2.9)$$

$$\rho_{rắn \rightarrow lỏng} = \frac{\rho_{nguyên khối} - \rho_{bột}}{T_m - T_s} (T - T_s) + \rho_{bột} \quad (2.10)$$

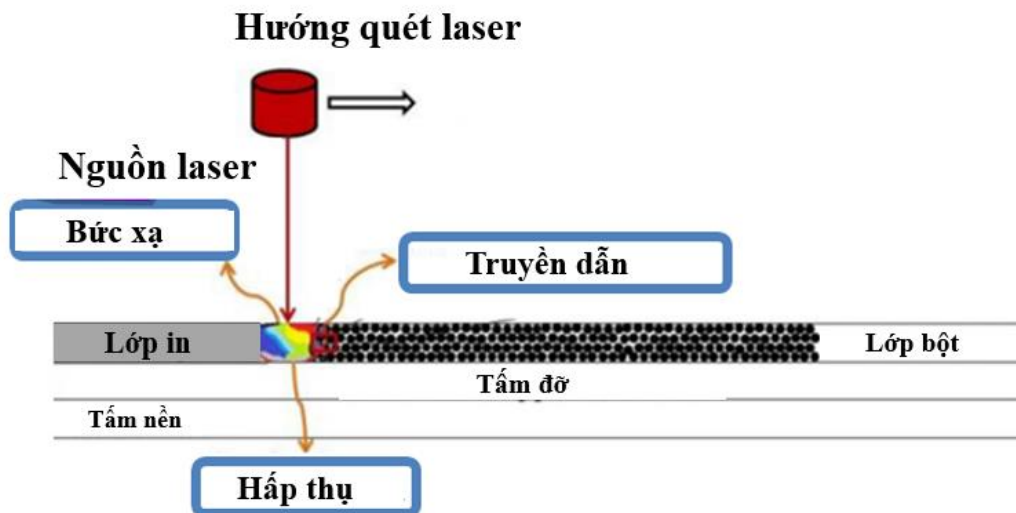
Khối lượng riêng và độ dẫn nhiệt của vật liệu ở trạng thái bột được tính toán bằng các phương trình sau. Trong đó  $\rho_{nguyên khối}$  và  $k_{nguyên khối}$  là khối lượng riêng và độ dẫn nhiệt của vật liệu khi độ rỗng bằng 0.

$$\rho_{bột} = (1 - 0.43) \rho_{nguyên khối} \quad (2.11)$$

$$k_{bột} = k_{nguyên khối} (1 - 0.43)^4 \quad (2.12)$$

### 2.3. Mô hình truyền nhiệt khi in SLM

Khi nguồn laser quét trên bề mặt lớp bột, năng lượng được truyền từ lớp trên cùng xuống các lớp dưới thông qua nhiều thay đổi vật lý khác nhau, chẳng hạn như: truyền nhiệt, bức xạ, đối lưu, dẫn nhiệt, dòng chất lỏng chảy trong vùng nóng chảy, nóng chảy, bay hơi và phản ứng hóa học [58].



**Hình 2.12. Mô hình truyền nhiệt khi in SLM [59]**

Mô hình toán để xác định nhiệt độ trong quá trình in trong môi liên hệ với thuộc tính nhiệt của vật liệu, thông số công nghệ in được thể hiện như sau [30]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C V \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q_{\text{nguồn nhiệt}} \quad (2.13)$$

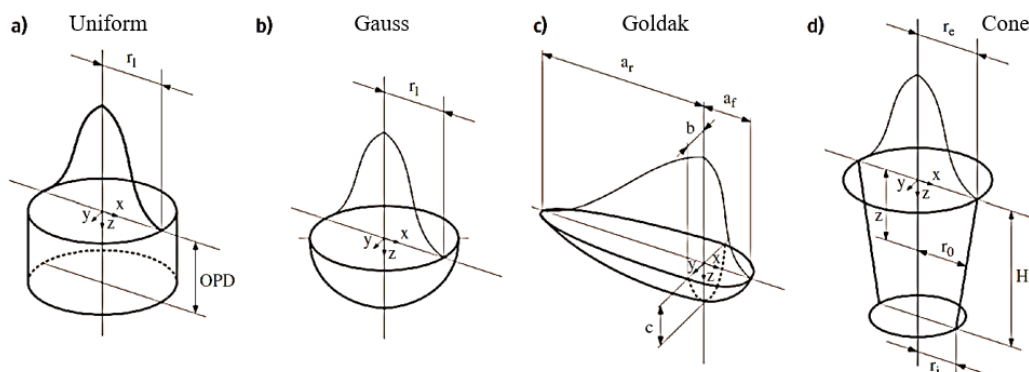
Với  $T$  là nhiệt độ (K);  $\rho$  là khối lượng riêng của vật liệu ( $\text{kg/m}^3$ );  $C$  là nhiệt dung ( $\text{J}/(\text{kg.K})$ );  $k$  là độ dẫn nhiệt ( $\text{W}/(\text{m.K})$ );  $V$  là vận tốc in ( $\text{m/s}$ );  $Q_{\text{nguồn nhiệt}}$  là năng lượng laser phân bố cho vùng cần in của lớp in ( $\text{W/m}^3$ ). Năng lượng nguồn laser được xác định trên cơ sở là tổng năng lượng hấp thụ, truyền dẫn và bức xạ như thể hiện ở Hình 2.12.

Năng lượng laser phân bố cho vùng cần in được xác định như sau:

$$Q_{\text{nguồn nhiệt}} = Q_{\text{công suất yêu cầu}} + Q_{\text{dẫn nhiệt}} \quad (2.14)$$

$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = Q_{\text{nguồn laser đến}} - Q_{\text{đổi lưu}} - Q_{\text{bức xạ}} - Q_{\text{dẫn nhiệt}} \quad (2.15)$$

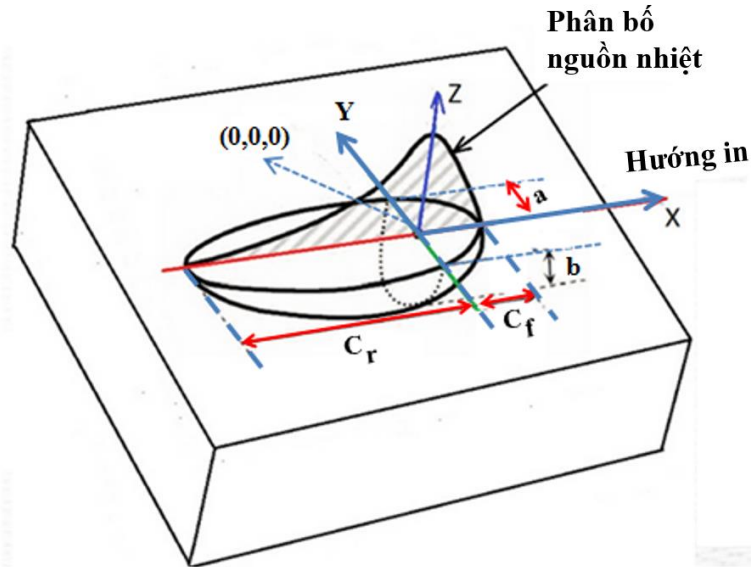
Các mô hình phân bố nguồn nhiệt khi in được thể hiện ở Hình 2.13. Hình 2.14 thể hiện các thông số của mô hình Goldak biểu diễn phân bố năng lượng laser [60].



**Hình 2.13. Các mô hình phân bố nguồn nhiệt [61]**

Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Goldak được xác định như sau:

$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = Q \frac{6\sqrt{3}}{ab\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2}\right]} \left[ \frac{f_f}{c_f} e^{\frac{-3x^2}{c_f^2}} + \frac{f_r}{c_r} e^{\frac{-3x^2}{c_r^2}} \right] \quad (2.16)$$

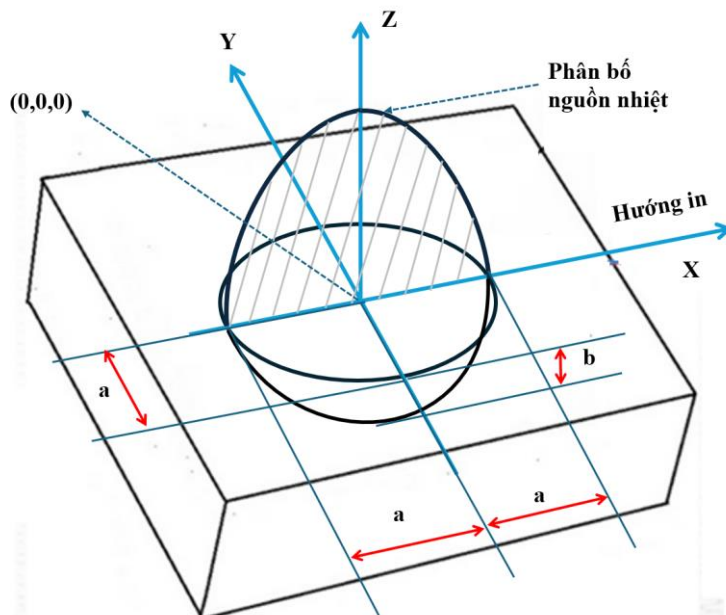


**Hình 2.14. Mô hình Goldak biểu diễn phân bố năng lượng laser**

Hình 2.15 thể hiện mô hình Gauss biểu diễn phân bố năng lượng laser [62, 63].

Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Gauss được xác định như sau:

$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = 2Q \frac{6\sqrt{3}}{a^2 b \pi \sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2} + \frac{-3x^2}{a^2}\right]} \quad (2.17)$$



**Hình 2.15. Mô hình Gauss biểu diễn phân bố năng lượng laser**

### Xác định năng lượng của laser

Trong quá trình SLM, sự giãn nở nhiệt xảy ra bên trong các lớp của chi tiết in, có thể dẫn đến biến dạng. Quá trình in được đảm bảo hay không phụ thuộc vào năng lượng laser. Khi xem xét các thông số quy trình in, mật độ năng lượng thể tích  $E_v$  ( $J/mm^3$ ) được tính toán như sau [64]:

$$E_v = \frac{Q_{\text{năng lượng nung chảy}}}{V \cdot t \cdot h_a} \quad (2.18)$$

Trong đó  $V$  là tốc độ in (mm/s),  $h_a$  là khoảng cách đường in (mm), và  $t$  là độ dày lớp (mm).

Từ giá trị năng lượng nóng chảy, nguồn nhiệt laser được tính như sau:

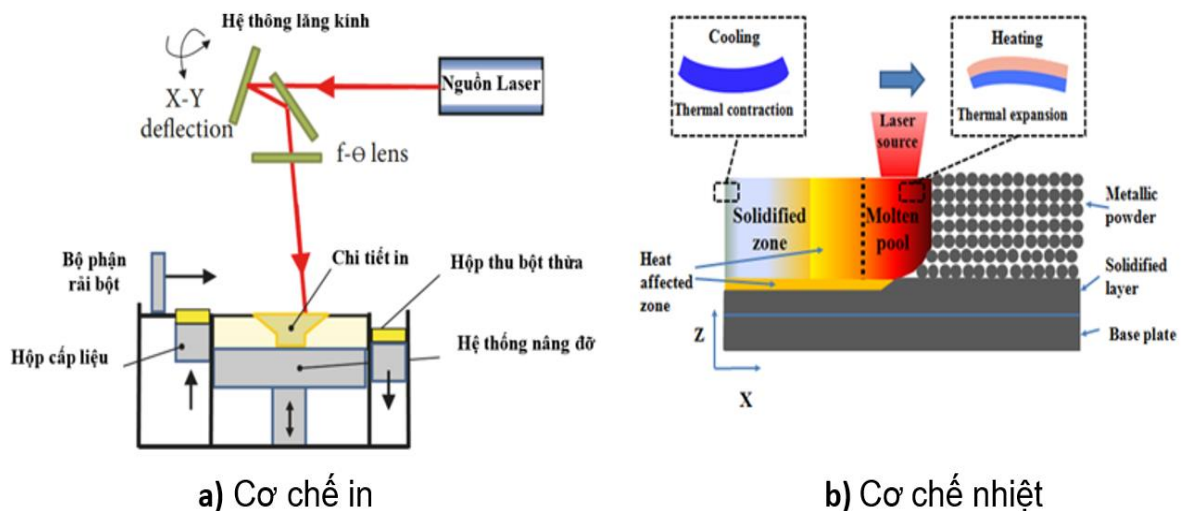
$$Q_{\text{nguồn laser}} = Q_{\text{năng lượng nung chảy}} + \Delta Q \quad (2.19)$$

$\Delta Q$  thể hiện tổn thất năng lượng laser bao gồm năng lượng laser tiêu thụ cho dẫn nhiệt, đối lưu, bức xạ, phản xạ và phát xạ. Để tính đến năng lượng laser cần thiết cho việc nóng chảy bột, hiệu suất năng lượng laser ( $\eta$ ) được định nghĩa như sau:

$$\eta = \frac{Q_{\text{năng lượng nung chảy}}}{Q_{\text{nguồn laser}}} \quad (2.20)$$

### 2.4. Cơ chế in SLM

Hình 2.16 thể hiện sơ đồ của quy trình SLM. Máy in sử dụng hệ thống bột mịn để phân phối một lớp 20-100  $\mu m$  lên tấm nền bên trong buồng chứa khí trơ. Sau đó, lớp này được hợp nhất bằng cách quét chùm tia laser trên bề mặt bột. Năng lượng laser cường độ cao làm tan chảy hoàn toàn bột kim loại để tạo thành kim loại rắn. Quá trình này được lặp lại hết lớp này đến lớp khác cho đến khi hoàn thành phần chi tiết in.



Hình 2.16. Nguyên lý in theo công nghệ nóng chảy bằng tia laser có chọn lọc

Nguyên lý truyền năng lượng nhiệt trong quy trình của SLM được thể hiện trong Hình 2.16, khi chùm tia laser quét trên bề mặt bột, năng lượng được truyền từ bề mặt trên xuống dưới bề mặt thông qua các hiện tượng vật lý khác nhau, chẳng hạn như sự hấp thụ và tán xạ của bức xạ laser, nhiệt chuyển, dòng chất lỏng trong bể nóng chảy, sự tan chảy/bốc hơi và các phản ứng hóa học.

Sự tan chảy bột xảy ra khi nhiệt độ đạt đến nhiệt độ nóng chảy của vật liệu. Kích thước của vũng nóng chảy bị ảnh hưởng lớn bởi năng lượng áp dụng trung bình trên một đơn vị thể tích, năng lượng này chủ yếu được kiểm soát bởi các thông số quy trình bao gồm công suất laser và tốc độ quét. Nhiều nghiên cứu cho thấy rằng tốc độ quét cao hơn dẫn đến tỷ lệ chiều dài và đường kính trong bể nóng chảy ngày càng tăng. Một vũng nóng chảy như vậy có tỷ lệ chiều dài và đường kính lớn hơn  $\pi$  sẽ gây ra hiệu ứng bóng. Hiệu ứng bóng có thể được đặc trưng bởi sự vỡ của bề mặt nóng chảy thành các quả bóng, làm suy giảm tính toàn vẹn bề mặt của các thành phần cuối cùng. Do đó, để đạt được tính toàn vẹn bề mặt tối ưu, phạm vi tốc độ quét tối ưu bị giới hạn bởi hiệu ứng bóng. Một nghiên cứu khác cũng báo cáo rằng công suất laser cao hơn có thể mở rộng phạm vi để đạt tốc độ tối ưu [65].

Bản chất của quá trình gia nhiệt bằng laser đối với lớp bột khác biệt đáng kể so với quá trình gia nhiệt bằng laser đối với một khối rắn vì hai lý do. Đầu tiên, độ hấp thụ laser của các lớp bột cao hơn đáng kể so với độ hấp thụ của khối vật liệu khối do mật độ và hình dạng hạt khác nhau của chúng [65], [66]. Thứ hai, độ dẫn nhiệt của lớp bột thấp hơn nhiều so với vật liệu nguyên khối do các hạt bột có diện tích tiếp xúc với nhau hạn chế, do đó, sự truyền nhiệt chỉ bị chi phối bởi độ dẫn nhiệt thấp của khí [67]. Do những khác biệt này, có thể suy ra rằng việc thay đổi đường kính và độ nén của bột có thể ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính dẫn nhiệt trong SLM.

Trong quy trình SLM, độ dốc nhiệt lớn nhất được tạo ra do sự gia nhiệt nhanh chóng của bề mặt phía trên bằng tia laser và sự dẫn nhiệt chậm của các lớp bên dưới [68]. Độ dốc nhiệt độ gây ra độ căng bề mặt trong bể nóng chảy có thể gây ra chuyển động đối lưu. Độ dốc nhiệt độ cũng gây ra ứng suất bên trong cao. Như được hiển thị trong Hình 2.16(b), khi chùm tia laser chiếu vào bề mặt trên cùng, sự

giãn nở của lớp được làm nóng bị hạn chế bởi khu vực lân cận, do đó, ứng suất nén được tạo ra trên bề mặt trên cùng. Khi đạt đến giới hạn chảy của vật liệu, sự biến dạng dẻo sẽ xảy ra. Khi tia laser di chuyển ra xa, quá trình làm mát diễn ra; sự co lại của lớp trên cùng sau đó bị hạn chế bởi khu vực xung quanh, dẫn đến ứng suất kéo dư trên bề mặt trên. Ứng suất kéo dư sẽ tích tụ trong mỗi lần quét laser, có thể gây ra hiện tượng tách lớp hoặc nứt. Ngoài ra, quá trình làm mát và co ngót sẽ tạo ra các lớp trên cùng ngắn hơn các lớp dưới cùng, do đó, chi tiết bị biến dạng do uốn cong về phía chùm tia laser.

Độ dốc nhiệt độ kiểm soát sự hình thành, chuyển động và quá trình hóa rắn nhanh chóng của bề nóng chảy, xác định trực tiếp cấu trúc vi mô, tính chất vật liệu và tính toàn vẹn bề mặt cuối cùng của sản phẩm in. Người ta nhận thấy rằng vật liệu được xử lý bằng SLM có cấu trúc vi mô rất mịn [69]. Tuy nhiên, lượng nhiệt đầu vào quá mức sẽ làm các hạt bị kéo dài và tạo ra vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ), điều này sẽ làm giảm tính chất cơ lý của sản phẩm in.

Cơ chế gradient nhiệt độ rất quan trọng đối với SLM vì những lý do sau: nó trực tiếp kiểm soát kích thước và độ ổn định của bề nóng chảy, đóng vai trò lớn trong việc xác định độ nhám bề mặt và độ xốp của các chi tiết. Độ dốc nhiệt độ cũng kiểm soát sự hình thành HAZ, ứng suất kéo và biến dạng chi tiết. Nếu độ dốc nhiệt độ có thể được đo và kiểm soát chính xác thì tính toàn vẹn bề mặt và chức năng của sản phẩm in có thể được cải thiện đáng kể. Tuy nhiên, gradient nhiệt độ rất khó đo do kích thước rất nhỏ và tính chất nhất thời của nó. Do đó, mô phỏng phần tử hữu hạn đã được sử dụng trong nhiều công trình nghiên cứu để hiểu rõ hơn về cơ chế xử lý.

Sau đó, giá trị biến dạng dư do nhiệt này được sử dụng để tính toán biến dạng của chi tiết in. Biến dạng dư do nhiệt hay biến dạng “Eigen” là tên gọi chung để biểu hiện biến dạng không đàn hồi. Thuật ngữ biến dạng dư do nhiệt được Ueda sử dụng lần đầu tiên vào năm 1975 để phân tích quá trình hàn. Năm 1982, Mura đã định nghĩa những biến dạng này với tên “Eigen strain”. Các biến dạng này bao gồm biến dạng nhiệt, biến dạng chuyển pha, biến dạng dẻo và biến dạng rão [70-72].

Do quá trình tăng và giảm nhiệt theo chu trình của SLM, biến dạng tổng được tính bằng tổng của các thành phần: biến dạng đàn hồi và biến dạng dư do nhiệt (biến dạng không đàn hồi), được thể hiện bằng công thức:

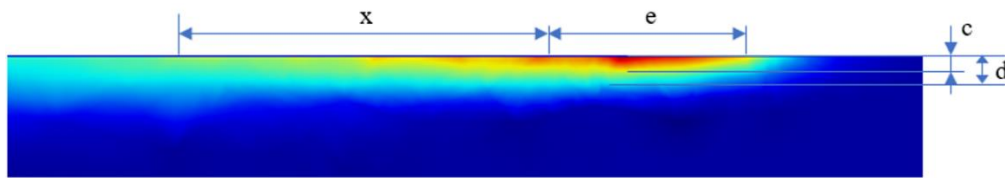
$$\varepsilon_{tổng} = \varepsilon_{đàn\ hồi} + \varepsilon^* \quad (2.21)$$

Trong đó:  $\varepsilon_{đàn\ hồi}$ : Biến dạng đàn hồi;  $\varepsilon^*$ : Biến dạng dư do nhiệt  
 Giá trị của biến dạng dư do nhiệt được xác định bằng công thức sau:

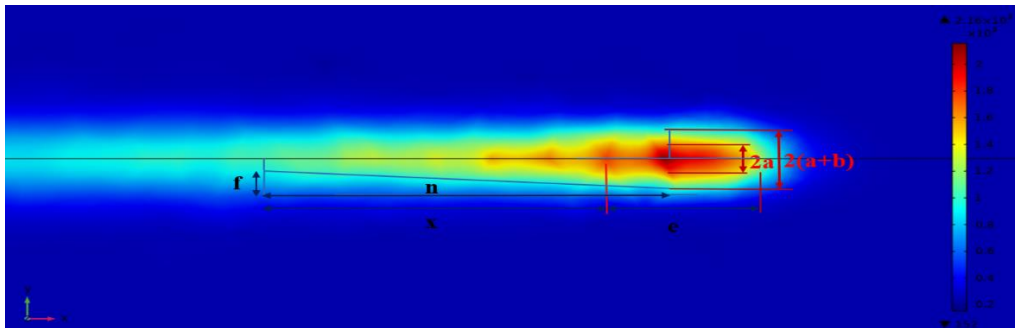
$$\varepsilon^* = \varepsilon_{nhiệt} + \varepsilon_{dẻo} + \varepsilon_{chuyển\ pha} + \varepsilon_{rão} \quad (2.22)$$

#### 2.4.1. Quá trình in 1 lớp

Sau khi rải lớp bột đầu tiên lên bàn máy, nguồn laser tiến hành gia nhiệt theo chu trình được thiết lập sẵn. Hình 2.17 và Hình 2.18 thể hiện vùng truyền nhiệt trong quá trình in 1 đường từ trái sang phải.



**Hình 2.17. Vùng truyền nhiệt trên mặt phẳng ZX**



**Hình 2.18. Vùng truyền nhiệt trên mặt phẳng XY**

Các vùng nhiệt được phân màu từ xanh nước biển đến đỏ thẫm thể hiện nhiệt độ ban đầu của bột kim loại đến nhiệt độ nóng chảy của bột. Vị trí đỏ thẫm nhất trên hình là vị trí hiện được nguồn laser chiếu xuống. Vùng vàng cam đỏ là vùng đang trong giai đoạn gia nhiệt và nóng chảy. Tại đây, bột kim loại chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái lỏng, tạo thành “vũng nóng chảy”. Vùng xanh nhạt cho đến vàng – khu vực nguồn laser đã đi qua đang trong giai đoạn làm nguội và hóa rắn. Quá trình làm nguội rất nhanh này khiến vật liệu chuyển từ trạng thái lỏng sang trạng thái rắn ở nhiệt độ thấp hơn. Chính sự thay đổi nhiệt độ đột ngột đó khiến vật liệu của chi tiết in

chịu một lực nén dẫn đến hình thành biến dạng nội tại ba chiều (Inherent Strain - IS), được định nghĩa như sau:

$$\varepsilon_x^* = \frac{W_x}{F_x}; \varepsilon_y^* = \frac{W_y}{F_y}; \varepsilon_z^* = \frac{W_z}{F_z} \quad (2.27)$$

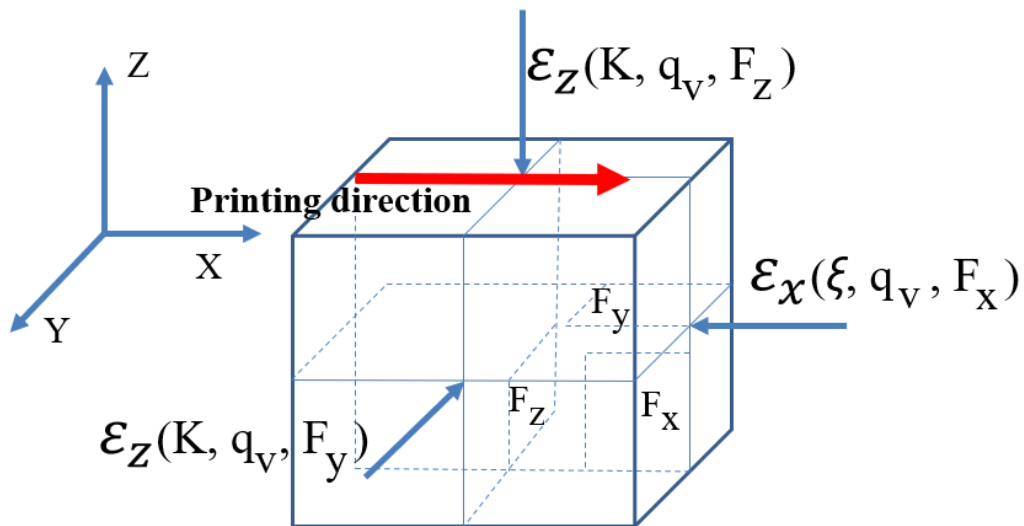
Trong đó:  $F_x$ ,  $F_y$ , và  $F_z$  là diện tích các vùng chịu ảnh hưởng nhiệt (HAZ) do các đại lượng  $W_x$ ,  $W_y$ , and  $W_z$  được phân bố. Giá trị của các đại lượng  $W_x$ ,  $W_y$ , và  $W_z$  được tính như sau:

$$W_x = \xi \cdot q_v; W_y = W_z = K \cdot q_v \quad (2.28)$$

Trong công thức trên,  $q_v$  là mật độ năng lượng tuyến tính (J/mm).

$$q_v = \frac{Q_{nguồn\ nhiệt}}{v} \quad (2.29)$$

Các giá trị  $\xi$  and  $K$  (mm/J) lần lượt là hệ số biến dạng nội tại dọc và ngang. Hình 2.19 thể hiện các thành phần biến dạng nội tại  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  và  $\varepsilon_z$  với các tham số này.



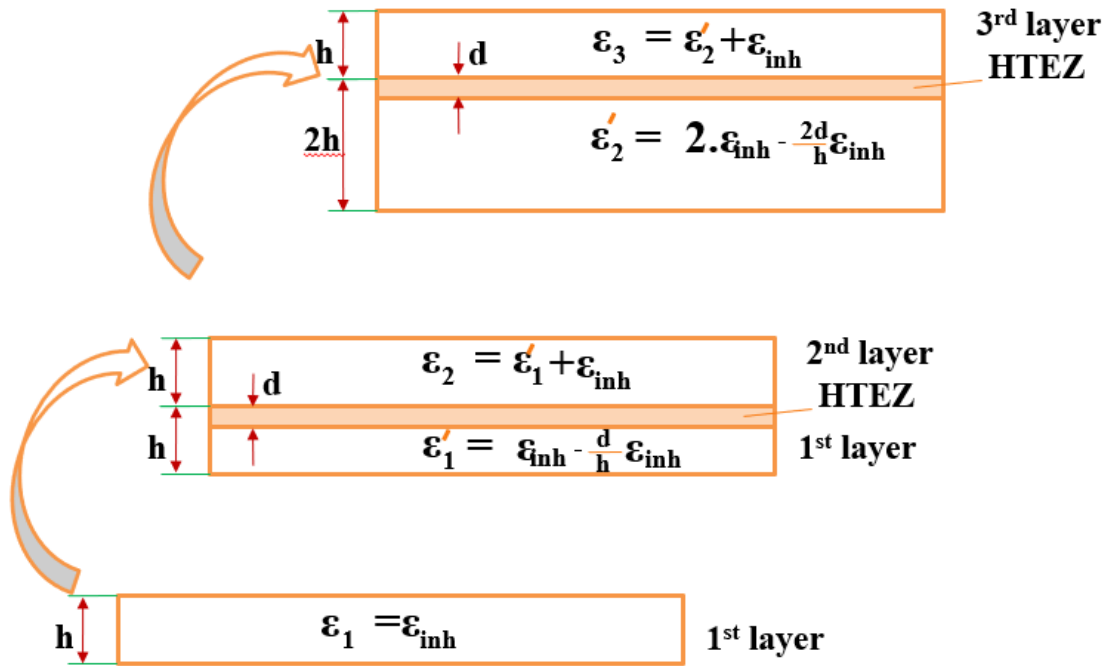
**Hình 2.19. Các thành phần biến dạng nội tại**

Các biến dạng nội tại theo hướng x, y và z cho lớp đầu tiên được tính toán như sau:

$$\varepsilon_{inh-x} = -\frac{\xi \cdot q_v}{F_x}; \varepsilon_{inh-y} = -\frac{K \cdot q_v}{F_y}; \varepsilon_{inh-z} = -\frac{K \cdot q_v}{F_z} \quad (2.30)$$

#### 2.4.2. Quá trình in nhiều lớp

Sau khi hoàn thiện lớp in đầu tiên, giá trị biến dạng nội tại IS là  $\varepsilon_{inh}$ . Máy in sẽ tiếp tục triển khai in tiếp lớp 2, 3 đến lớp n. Cách tính toán biến dạng nội tại cho n lớp được thể hiện qua Hình 2.20.



**Hình 2.20. Phương pháp tính toán biến dạng nội tại của toàn bộ các lớp in theo bề mặt vùng xử lý nhiệt HTEZ [54]**

Khi tiến hành in lớp thứ 2, lớp đầu tiên được làm nóng chảy lại với vùng ảnh hưởng nhiệt mới, vì vậy giá trị IS còn lại cho lớp đầu tiên [54]:

$$\epsilon'_1 = \epsilon_{inh} - \frac{d}{h} \epsilon_{inh} \quad (2.31)$$

Sau đó, lớp thứ 2 được thêm vào, giá trị IS của lớp này là:

$$\epsilon_2 = \epsilon'_1 + \epsilon_{inh} = 2\epsilon_{inh} - \frac{d}{h} \epsilon_{inh} \quad (2.32)$$

Khi lớp thứ 3 được thêm vào, giá trị IS mới của lớp thứ 2 sẽ là:

$$\epsilon'_2 = \epsilon_2 - \frac{d}{h} \epsilon_{inh} = 2\epsilon_{inh} - \frac{2d}{h} \epsilon_{inh} \quad (2.33)$$

Và giá trị IS trong lớp thứ 3 được tính toán như sau:

$$\epsilon_3 = \epsilon'_2 + \epsilon_{inh} = 3\epsilon_{inh} - \frac{2d}{h} \epsilon_{inh} \quad (2.34)$$

Lặp lại quy trình SLM này cho  $n$  lớp, chúng ta có thể tính toán giá trị IS cho  $n$  lớp như sau:

$$\epsilon_n = \epsilon'_{n-1} + \epsilon_{inh} = n\epsilon_{inh} - \frac{(n-1)d}{h} \epsilon_{inh} \quad (2.35)$$

Đối với toàn giá trị theo hướng x, y, z, chúng ta có giá trị IS như sau:

$$\begin{cases} \varepsilon_x (n \text{ lớp in}) = n\varepsilon_{inh-x} - \frac{(n-1)d}{h} \varepsilon_{inh-x} \\ \varepsilon_y (n \text{ lớp in}) = n\varepsilon_{inh-y} - \frac{(n-1)d}{h} \varepsilon_{inh-y} \\ \varepsilon_z (n \text{ lớp in}) = n\varepsilon_{inh-z} - \frac{(n-1)d}{h} \varepsilon_{inh-z} \end{cases} \quad (2.36)$$

## 2.5. Các thông số chế độ in ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in, các yếu tố này có thể được phân loại thành bốn nhóm gồm các yếu tố liên quan đến vật liệu như đặc điểm phân bố kích thước hạt, tính chất về nhiệt của vật liệu; các yếu tố liên quan đến máy và phương pháp in; các yếu tố liên quan đến điều kiện in như sấy bột, sấy tấm nền hay không và các phương pháp xử lý sau in; các yếu tố liên quan đến chế độ in. Trong nghiên cứu này các thông số của quá trình in bao gồm công suất nguồn laser U, chiều dày lớp in t, vận tốc in V được xem xét là các thông số ảnh hưởng chính của chế độ in tới độ sai lệch hình dạng, chất lượng bề mặt và đặc điểm cấu trúc tế vi của vật liệu bột Ti6Al4V với phương pháp in SLM.

Cơ sở để lựa chọn ba thông số này, cùng với dải giá trị khảo sát của chúng, được thiết lập dựa trên việc tổng hợp các công trình nghiên cứu trước đây kết hợp với kết quả của bài toán mô phỏng số trường nhiệt độ. Nhằm hạn chế các rủi ro và tiết kiệm chi phí thực nghiệm, công cụ mô phỏng được sử dụng để đánh giá trước mức độ ảnh hưởng nhiệt năng. Nhờ đó, nghiên cứu đã xác định được khoảng thông số giới hạn an toàn sao cho nhiệt độ tại bề nóng chảy luôn duy trì ở mức lý tưởng: phải cao hơn nhiệt độ nóng chảy của vật liệu để đảm bảo sự liên kết hoàn toàn giữa các lớp in, nhưng đồng thời phải thấp hơn ngưỡng bay hơi để ngăn chặn sự hình thành khuyết tật rỗ xốp. Dải giá trị tối ưu rút ra từ quá trình mô phỏng này chính là cơ sở khoa học vững chắc để thiết lập ma trận quy hoạch thực nghiệm.

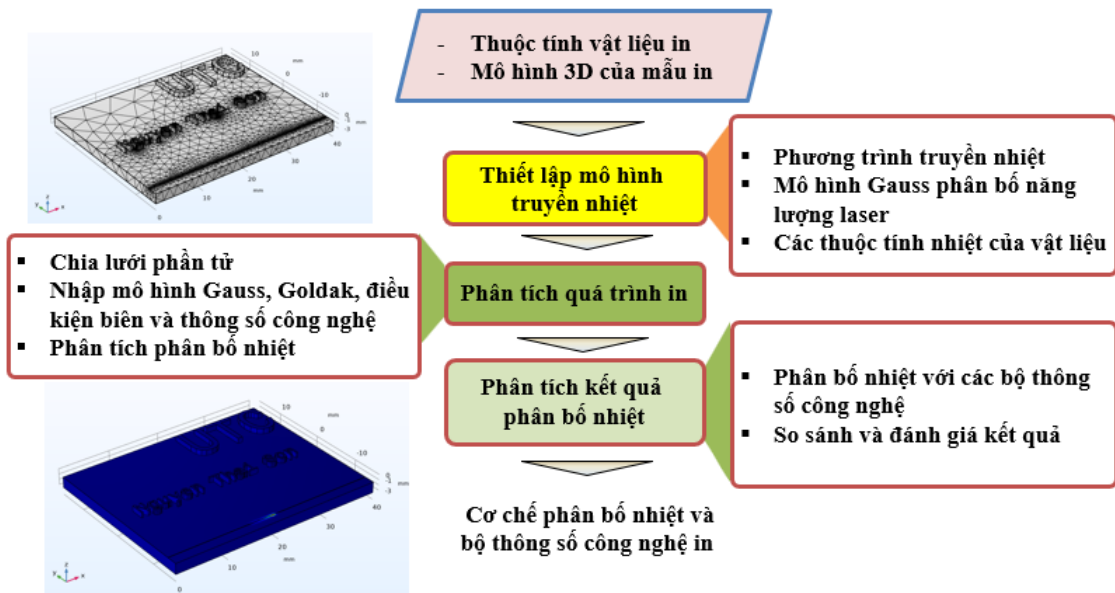
**Bảng 2.2. Bộ thông số in trong một số nghiên cứu trong công nghệ in SLM.**

STT	Máy in SLM	U (W)	V (mm/s)	t ( $\mu\text{m}$ )	$h_a$ ( $\mu\text{m}$ )
[73]	Máy SLM Solutions Group AG (Lübeck, Germany)	260 - 380	1000 – 1700	30 - 60	110 - 150
[74]	Máy SLM 250HL (SLM Solutions Group AG, Germany)	120 – 360	400 - 1200	50	125
[75]	Máy HRPM-II type SLM	180 – 380	300 – 800	30 - 60	120
[76]	Máy SLM 280HL	150 - 165	100 - 500	50	120

Bảng 2.2 thể hiện bộ thông số công nghệ in được sử dụng trong một số nghiên cứu gần đây với phương pháp in SLM cho vật liệu bột Ti6Al4V. Như đề cập ở trên, tùy thuộc vào đặc điểm phân bố kích thước hạt, tính chất về nhiệt của vật liệu cũng như các yêu cầu về đầu ra, về máy in và quy trình in hiện có để xác định khoảng phạm vi thay đổi các thông số công nghệ phù hợp. Về khoảng cách giữa các đường in sẽ ảnh hưởng chính tới năng suất in, thông thường với phương pháp in SLM, khoảng cách giữa các đường in trong khoảng 70 đến 80% đường kính hội tụ của chùm laser.

## **2.6. Phương pháp mô phỏng khảo sát các thông số chế độ in**

Phương pháp mô phỏng cho phép xác định được khoảng giá trị bộ thông số công nghệ phù hợp nhằm phục vụ cho nghiên cứu thực nghiệm. Thông qua mô phỏng trường nhiệt độ khi in sẽ thay đổi khi thay đổi giá trị của các thông số công nghệ in. Để xác định phân bố nhiệt trong quá trình in, các bước thực hiện được thể hiện trên Hình 2.21.



**Hình 2.21. Các bước xác định phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ**

Cơ chế phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ in đã được xác định ứng dụng phần mềm Comsol với các bước từ thiết lập mô hình truyền nhiệt, phân tích quá trình in tới phân tích kết quả phân bố nhiệt. Trong bước thiết lập mô hình truyền nhiệt, các mô hình nhiệt như mô hình Gauss, mô hình Goldak thể hiện năng lượng laser phân bố và các thuộc tính vật liệu được nhập vào môi trường Comsol. Để phân tích quá trình in, phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng, mô hình in được chia lưới cho phân tích; điều kiện biên và các thông số công nghệ in được thiết lập. Kết quả phân bố nhiệt với các bộ thông số công nghệ in khác nhau như công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in nhằm xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp.

## 2.7. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm $2^k$

### 2.7.1. Quy hoạch thực nghiệm

Quy hoạch thực nghiệm (QHTN) là kỹ thuật định nghĩa và nghiên cứu tất cả các điều kiện khả thi trong các thí nghiệm có nhiều yếu tố ảnh hưởng. Quy hoạch thực nghiệm được giới thiệu lần đầu tiên vào năm 1935 bởi Ronald A. Fisher trong tài liệu “Design of Experiment” [77].

Vào năm 1950, Geotruide Mary Cox và William Gemmell Cochran xuất bản sách “Experimental Designs” và trở thành sách tham khảo chính về QHTN trong nhiều năm [78].

Trong QHTN, các thí nghiệm được thiết kế dựa trên các yếu tố ở các mức cụ thể. Trong bảng thiết kế của QHTN, các yếu tố được liệt kê ở tiêu đề cột, số lần chạy thí nghiệm được liệt kê ở tiêu đề hàng, và mức độ của mỗi yếu tố được hiển thị trong từng ô.

QHTN đóng vai trò then chốt trong nhiều lĩnh vực từ khoa học, công nghệ, kỹ thuật đến kinh tế và dịch vụ. Mục đích chính của QHTN là thiết kế và phát triển sản phẩm/quy trình mới, nâng cao chất lượng sản phẩm hiện có và quản lý các quá trình sản xuất.

Nội dung chủ yếu chọn phương pháp QHTN là trả lời cho câu hỏi: ở các mức giá trị nào và sự kết hợp như thế nào giữa các nhân tố trong thực nghiệm.

Thực nghiệm mà khi đó số mức thay đổi của tất cả các nhân tố như nhau, và tất cả tổ hợp này đều được sử dụng trong nghiên cứu gọi là thực nghiệm nhân tố toàn phần (TNT).

Nếu số mức thay đổi nhân tố là 2, và số nhân tố là  $k$  thì số thí nghiệm thực hiện là  $N=2^k$ . Theo kết quả TNT  $2^k$  ta có thể nhận được phương trình hồi quy tuyến tính:

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots+b_kx_k \quad (2.37)$$

Phương trình này có thể bổ sung thêm các thành phần là tích các nhân tố, hay gọi là các tương tác  $b_{ij}x_ix_j$

Thực nghiệm nhân tố riêng phần (TNR) cho phép ta giảm bớt số thí nghiệm chính so với TNT trong trường hợp phương trình hồi quy (PTHQ) có số nhỏ hơn rất nhiều so với tổng số thí nghiệm chính  $N=2^k$ .

### **2.7.2. Quy hoạch thực nghiệm nhân tố toàn phần $2^k$**

Trong lý thuyết QHTN thì thực nghiệm toàn phần (TNT) có rất nhiều ứng dụng trong nghiên cứu khoa học như:

- Ước lượng các nhân tố và hệ số phương trình hồi quy
- Xác định các tác nhân có ảnh hưởng nhất đến kết quả
- Dự đoán xu hướng thay đổi kết quả nghiên cứu

Ý tưởng xây dựng TNT với số thí nghiệm chính  $N=2^k + (1-3)$  đơn giản nhất cho trường hợp 2 nhân tố  $X_1$  và  $X_2$ . Cần chú ý:

- Đầu tiên cần chọn miền giá trị các nhân tố ( $X_{\min} < X < X_{\max}$ )

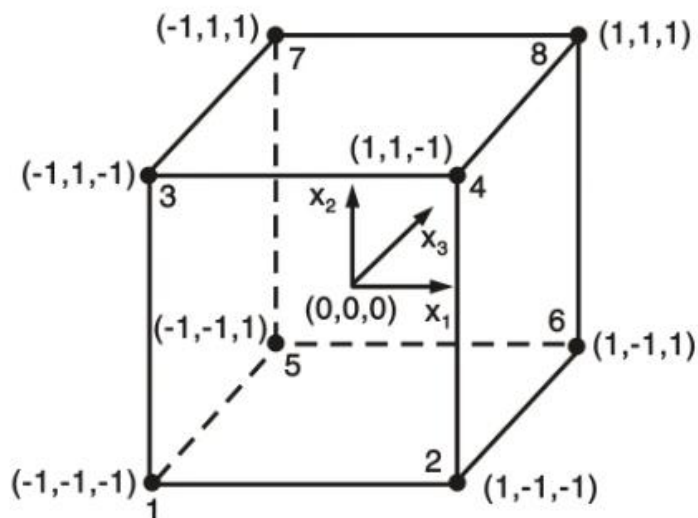
- Trong TNT  $2^k$  mỗi nhân tố đều thay đổi ở 2 mức – mức cao nhất và mức thấp nhất.
- Kết hợp tất cả giá trị có thể của các mức này giữa các nhân tố: khi đó đối với số nhân tố bất kỳ là  $k$  thì số thí nghiệm chính trong TNT là  $2^k$ .

Đối với TNT với 3 nhân tố, ký hiệu  $2^3$ , ma trận quy hoạch với các nhân tố được thể hiện trong Bảng 2.3

**Bảng 2.3. TNT với 3 nhân tố dạng mã hóa [79]**

N	Nhân tố tự nhiên			Nhân tố mã hóa			Kết quả
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	$X_{1min}$	$X_{2min}$	$X_{3min}$	-1	-1	-1	$y_1$
2	$X_{1max}$	$X_{2min}$	$X_{3min}$	+1	-1	-1	$y_2$
3	$X_{1min}$	$X_{2max}$	$X_{3min}$	-1	+1	-1	$y_3$
4	$X_{1max}$	$X_{2max}$	$X_{3min}$	+1	+1	-1	$y_4$
5	$X_{1min}$	$X_{2min}$	$X_{3max}$	-1	-1	+1	$y_5$
6	$X_{1max}$	$X_{2min}$	$X_{3max}$	+1	-1	+1	$y_6$
7	$X_{1min}$	$X_{2max}$	$X_{3max}$	-1	+1	+1	$y_7$
8	$X_{1max}$	$X_{2max}$	$X_{3max}$	+1	+1	+1	$y_8$

Bảng 2.3 chỉ ra điều kiện tiến hành thực nghiệm. Trình tự tiến hành thí nghiệm không nhất thiết phải theo thứ tự trên mà theo thuận tiện chọn giá trị các nhân tố.



**Hình 2.22. Biểu diễn hình học trường hợp 3 nhân tố dạng mã hóa [79]**

Các đỉnh của khối chữ nhật trong Hình 2.22 đại diện cho các mức thí nghiệm. Ở dạng mã hóa, các đỉnh này tương ứng với các đỉnh của một khối vuông. Khi số nhân tố  $k > 3$ , việc biểu diễn hình học trở nên rất hữu ích để hình dung nhưng lại khó thể hiện trên giấy.

Các ưu điểm TNT là do một số tính chất đặc biệt của ma trận thực nghiệm. Ma trận thực nghiệm TNT  $2^k$  với các nhân tố được mã hóa có các tính chất sau:

- **Tính đối xứng với tâm quy hoạch.** Tổng đại số các phần tử cột của bất kỳ nhân tố nào cũng bằng 0.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0 \quad (2.38)$$

Trong đó:  $x_{ij}$  - giá trị nhân tố  $i$  trong thí nghiệm thứ  $j$ ;  $i=1,2,\dots,k$ ;  $j=1,2,\dots,N$ ;

$N$  - số thí nghiệm chính trong quy hoạch

- **Tính chuẩn hóa.** Tổng bình phương các phần tử cột của một nhân tố bất kỳ bằng số thí nghiệm chính  $N$ :

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 = N$$

$$i = 1, 2, \dots, k \quad (2.39)$$

- **Tính trực giao.** Tổng của tích 2 cột bất kỳ trong ma trận quy hoạch bằng 0. Ví dụ trong trường hợp TNT:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}x_{uj} = 0; i \neq u; u = 1, 2, \dots, k \text{ là số nhân tố} \quad (2.40)$$

### 2.7.2.1. Biểu diễn mô hình hồi quy theo dạng tuyến tính

Các PTHQ dạng tổng quát:

- Không có tương tác:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2.41)$$

- Có thành phần tương tác:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{(k-1)k}x_{(k-1)}x_k \quad (2.42)$$

Trong nghiên cứu này, thực nghiệm nhân tố toàn phần  $2^3$  được sử dụng, ngoài 3 hệ số tương tác đôi  $x_1x_2$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$  ta còn tương tác 3 nhân tố  $x_1x_2x_3$ , nó được gọi là tương tác bậc 2. Mô hình khi đó có dạng:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (2.43)$$

Để xác định các hệ số trong PTHQ của TNT ta sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất. Sử dụng phương pháp này ta phải giải hệ phương trình với  $p$  ẩn số ( $p$  là hệ số PTHQ).

Các tính chất từ 1 đến 3 (công thức 2.38, 2.39 và 2.40) của TNT giúp cho việc xác định các hệ số PTHQ trở thành dễ dàng hơn. Đầu tiên ta tìm các hệ số PTHQ được viết dưới dạng mã hóa:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

Ta có ma trận xác định các hệ số PTHQ:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_{0j}^2 & \sum x_{0j} x_{1j} & \sum x_{0j} x_{2j} & \dots & \sum x_{0j} x_{kj} \\ \sum x_{1j} x_{0j} & \sum x_{1j}^2 & \sum x_{1j} x_{2j} & \dots & \sum x_{1j} x_{kj} \\ \sum x_{2j} x_{0j} & \sum x_{2j} x_{1j} & \sum x_{2j}^2 & \dots & \sum x_{2j} x_{kj} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum x_{kj} x_{0j} & \sum x_{kj} x_{1j} & \sum x_{kj} x_{2j} & \dots & \sum x_{kj}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum x_{0j} y_j \\ \sum x_{1j} y_j \\ \sum x_{2j} y_j \\ \vdots \\ \sum x_{kj} y_j \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Thay đường chéo bằng  $N$ , và do tính chất trực giao các thành phần còn lại bằng 0.

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum x_{0j} y_j \\ \sum x_{1j} y_j \\ \sum x_{2j} y_j \\ \vdots \\ \sum x_{kj} y_j \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Suy ra:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \sum x_{0j} y_j \\ \sum x_{1j} y_j \\ \sum x_{2j} y_j \\ \vdots \\ \sum x_{kj} y_j \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

### 2.7.2.2. Biểu diễn mô hình hồi quy theo hàm mũ

Mô hình hồi quy cũng được biểu diễn dạng hàm mũ như sau:

$$D = aU^b V^c t^d \quad (2.47)$$

Trong đó  $a, b, c, d$  là các thông số mô hình từ thực nghiệm.

Logarit hai vế của phương trình 2.47 ta có:

$$\ln(D) = \ln(a) + b \ln(U) + c \ln(V) + d \ln(t) \quad (2.48)$$

Đặt  $y = \ln(D)$ ;  $x_1 = \ln(U)$ ;  $x_2 = \ln(V)$ ;  $x_3 = \ln(t)$  ta có:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (2.49)$$

Với  $\beta_0 = \ln(a)$ ;  $\beta_1 = b$ ;  $\beta_2 = c$ ;  $\beta_3 = d$

Ma trận thiết kế  $X$ , với  $X$  được xác định như sau:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & x_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Giá trị hàm đầu ra  $y$ :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Giá trị của các tham số:

Với  $\beta = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3]$

Các giá trị  $\beta$  được xác định như sau (công thức OLS): Phương pháp bình phương tối thiểu [79].

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.52)$$

Từ đó các giá trị  $a, b, c, d$  được xác định như sau:

$$a = e^{\beta_0}; b = \beta_1; c = \beta_2; d = \beta_3 \quad (2.53)$$

### 2.7.3. Điểm trung tâm trong quy hoạch thực nghiệm $2^k$

Trong quy hoạch thực nghiệm  $2^k$ , điểm trung tâm là điểm thí nghiệm mà tất cả yếu tố đều được đặt ở mức trung bình của khoảng thí nghiệm đã chọn. Các giá trị (mã hóa) thấp và cao của mỗi biến lần lượt là  $\pm 1$ ; các điểm trung tâm là  $m$  phép đo được thực hiện khi tất cả các biến bằng 0. Thiết kế này có  $2^k + m$  điểm với  $m > 0$  [80].

Các điểm trung tâm lặp lại có hai công dụng. Thứ nhất, độ biến thiên giữa các kết quả ở điểm trung tâm cung cấp một ước lượng của sai số thuần. Thứ hai, phép so sánh giữa trung bình của các điểm trung tâm và trung bình của các điểm nhân tố cho phép kiểm định mức độ không phù hợp. Khi dữ liệu tuân theo mô hình bậc nhất, giá trị kỳ vọng của phép so sánh này bằng 0; còn khi dữ liệu tuân theo mô hình bậc hai, thì giá trị kỳ vọng của nó sẽ phụ thuộc vào các hạng tử bậc hai thuần túy.

## KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương 2 đã đưa ra cơ sở lý thuyết nhiệt - cơ cho quá trình in SLM. Bằng việc xây dựng mô hình truyền nhiệt ứng dụng nguồn nhiệt Gauss và Goldak, nghiên cứu đã làm rõ được cơ chế chuyển pha và sự hình thành ứng suất dư gây biến dạng chi tiết. Qua đó, khẳng định được mối liên hệ bản chất giữa các thông số công nghệ đầu vào, mật độ năng lượng laser và chất lượng sản phẩm in cuối cùng. Cụ thể:

- 1- Phân tích cơ chế in SLM và các thay đổi chuyển pha của vật liệu theo trường nhiệt độ là căn cứ xác định cơ chế hình thành ứng suất dư do nhiệt la nguyên nhân của biến dạng chi tiết in khi cắt khối tấm nền và cách xác định giá trị ứng suất dư khi in một lớp, nhiều lớp.
- 2- Xây dựng được mô hình truyền nhiệt khi in với các hệ số thể hiện tính chất nhiệt của vật liệu thay đổi theo nhiệt độ; cũng như xác định được nguồn nhiệt tiêu hao, hiệu suất truyền nhiệt từ nguồn laser tới vùng nóng chảy của vật liệu;
- 3- Phân tích các mô hình nhiệt của nguồn laser như Gauss, Goldak làm cơ sở để giải được phương trình truyền nhiệt nhằm xác định giá trị của nhiệt độ khi in 3D.
- 4- Xác định được các thông số công nghệ in ảnh hưởng đến năng lượng thể tích nguồn laser, ảnh hưởng đến quá trình in và sẽ dẫn đến ảnh hưởng đến chất lượng in.

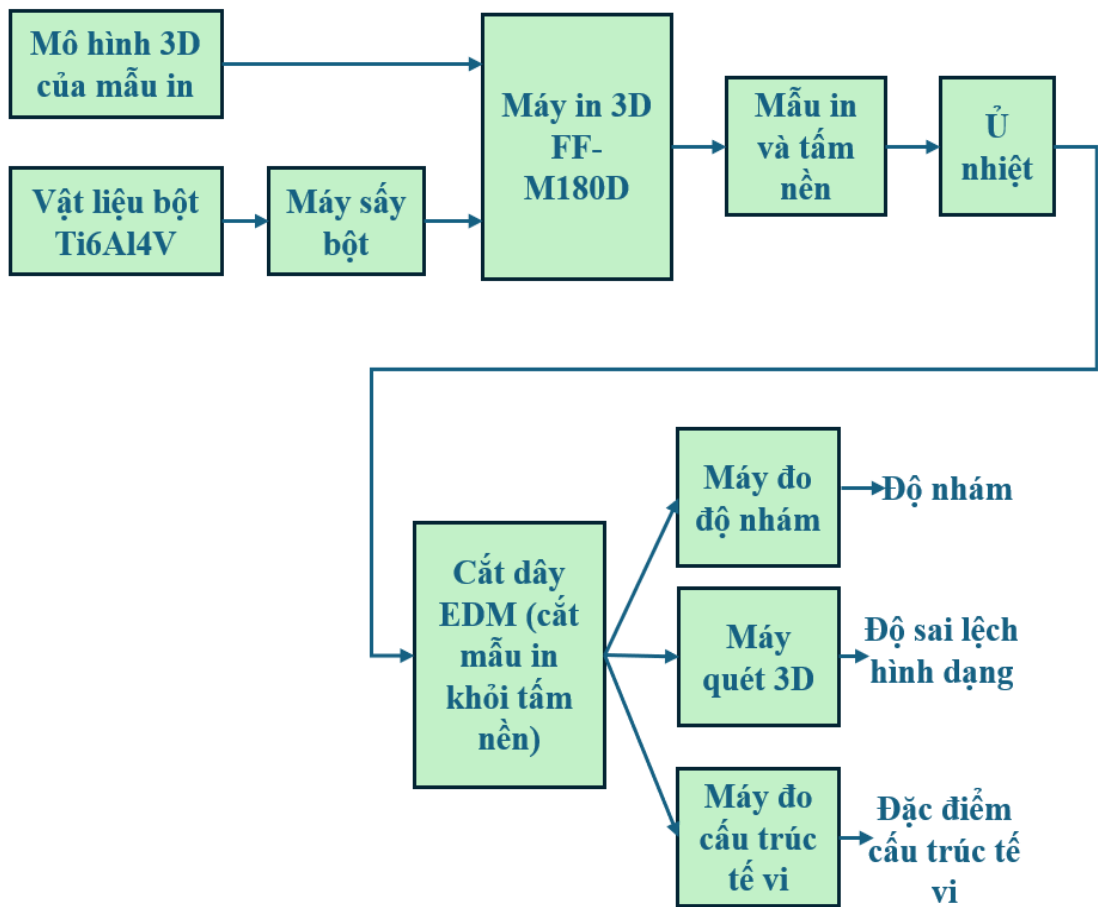
## CHƯƠNG 3

### HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Chương 3 giới thiệu các thiết bị thí nghiệm và phương pháp nghiên cứu để xác định các chỉ tiêu đầu ra của sản phẩm in, hệ thống thiết bị nhằm tạo ra các mẫu in đã được sử dụng bao gồm máy in 3D SLM, máy cắt dây EDM, máy sấy bột trước khi in, máy ủ nhiệt sau in và vật liệu in Ti6Al4V. Mẫu in sau đó được tiến hành đo để thu thập các dữ liệu về độ nhám bề mặt, độ chính xác hình học và đặc điểm cấu trúc tế vi. Để tiến hành thu thập dữ liệu đo, các thiết bị đo lường đã được sử dụng như máy đo độ nhám, máy đo cấu trúc tế vi, máy quét 3D. Để giới hạn phạm vi của bộ thông số công nghệ in, phương pháp mô phỏng số đã được sử dụng. Để xử lý dữ liệu đo được từ mẫu in nhằm xác định mối liên hệ giữa các chỉ tiêu chất lượng với bộ thông số công nghệ, phương pháp quy hoạch thực nghiệm đã được áp dụng.

#### **3.1. Hệ thống thiết bị được sử dụng trong nghiên cứu**

Để đánh giá độ chính xác hình dạng, độ nhám và đặc điểm cấu trúc tế vi của mẫu in, các bước thí nghiệm và hệ thống thiết bị cần thiết được thể hiện trên hình 3.1. Vật liệu bột Ti6Al4V được sấy ở nhiệt độ 200 °C. Mô hình 3D của mẫu in được chia lớp trên máy tính và được tạo file G code để chuyển tới máy in. Máy in 3D FF-M180D được sử dụng để in các mẫu in. Sau in mẫu in và tấm nền được ủ để khử ứng suất dư do nhiệt trong quá trình in. Để tách mẫu in khỏi tấm nền, máy cắt dây EDM được sử dụng. Để có được các thông số đầu ra độ chính xác hình dạng, độ nhám và đặc điểm cấu trúc tế vi, máy quét 3D, máy đo độ nhám và máy đo cấu trúc tế vi được sử dụng tương ứng.



**Hình 3.1. Các bước thí nghiệm và hệ thống thiết bị**

### 3.1.1. Máy in 3D SLM

Dựa trên kết quả mô phỏng trên phần mềm Comsol<sup>TM</sup>, các mẫu thí nghiệm được tiến hành trên máy in kim loại SLM FF-M180D tại công ty 3D HONY, Thôn 3, Xã Tân Hương, Huyện Ninh Giang, Tỉnh Hải Dương. Hình 3.2 thể hiện tổng thể máy in 3D FF-M180D theo phương pháp in SLM với các cụm chính như buồng in, màn hình điều khiển và bộ phận cấp khí bảo vệ buồng in khi in. Các thông số kỹ thuật chính của máy được thể hiện ở Bảng 3.1. với kích thước mẫu in tối đa dạng khối trụ với D 180mm, H 100mm; công suất nguồn laser 1000 W; chiều dày lớp in 0.02-0.06 mm



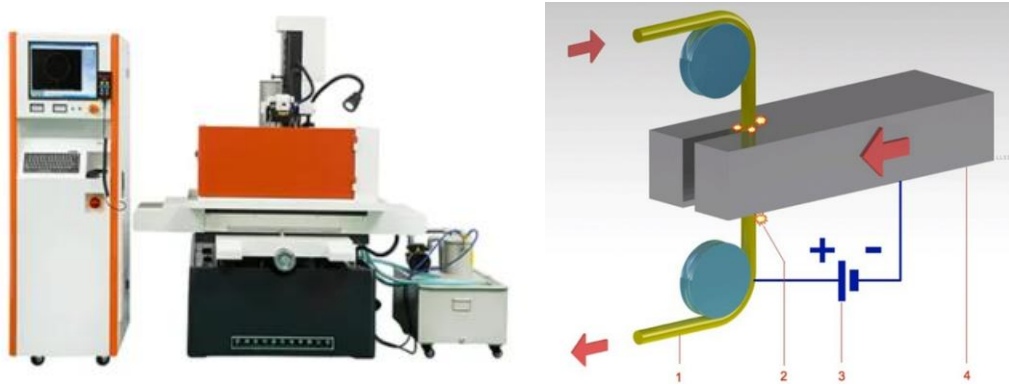
**Hình 3.2. Máy in kim loại SLM FF-M180D tại công ty 3D HONY**

**Bảng 3.1. Các thông số kỹ thuật của máy in 3D như sau:**

<b>Thông số kỹ thuật</b>	<b>Giá trị</b>
Diện tích xây dựng	Đường kính 180 mm, chiều cao 100 mm
Cài đặt tấm nền	Cố định từ tính
Độ chính xác	$\pm 0.05$ mm
Độ dày lớp	0.02-0.06 mm
Phương pháp trải bột	Cấp bột và trải bột hai chiều
Loại lưới	Lưới cao su
Tải bột tối đa	30 kg
Vật liệu in	CoCr, TC4, Ti
Số lượng laser	Laser đôi, hỗ trợ hoạt động laser đơn
Công suất laser	1000 W (hai laser 500 W)
Phương pháp làm mát	Nước
Đường kính tia laser	50-80 $\mu$ m
Khí bảo vệ	Ar/Nitrogen
Mức oxy tối thiểu	0.01%
Tiêu thụ năng lượng	3 KW
Tốc độ quét	0~7 m/s

### 3.1.2. Máy cắt dây EDM

Máy cắt dây EDM được sử dụng để cắt các mẫu in khối tấm nền.



**Hình 3.3. Máy cắt dây EDM và sơ đồ nguyên lý cắt**  
**Bảng 3.2. Các thông số kỹ thuật của máy cắt dây**

Mã máy	Goldsun GS4050B
Hành trình gia công	400*500 mm
Kích thước bàn làm việc	780*510 mm
Đường kính dây cắt	Ø0.1–Ø0.2 mm
Dòng điện gia công lớn nhất	5 A
Trọng lượng máy	1700 kg
Kích thước ngoài của máy	1900*1450*1800 mm

### 3.1.3. Máy sấy bột trước khi in



**Hình 3.4. Máy sấy bột kim loại 303-0B**

Bột Ti6Al4V được sấy ở nhiệt độ 200 °C trước khi in nhằm đảm bảo sấy khô đồng đều vật liệu, loại bỏ độ ẩm của bột in, tránh hiện tượng dính bột, giúp cải thiện chất lượng in.

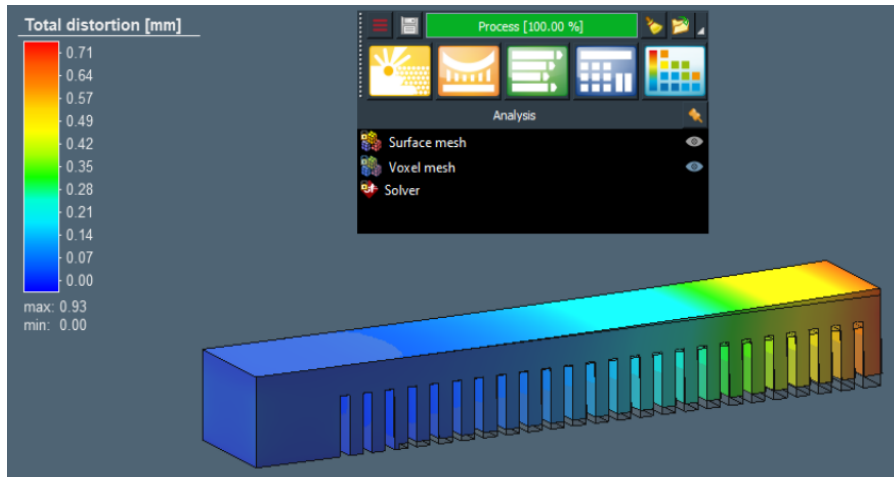
**Bảng 3.3. Các thông số kỹ thuật của máy sấy bột như sau:**

Mã máy	303-0B
Nguồn điện đầu vào	220 V, 50 Hz
Công suất định mức	300 W
Kích thước bên trong	250*250*250 mm
Kích thước tổng thể	550*320*400 mm
Khối lượng	12 kg
Phạm vi nhiệt độ (từ nhiệt độ phòng)	Nhiệt độ phòng +10-99 °C

**3.1.4. Máy xử lý sau in (ủ nhiệt)****Hình 3.5. Máy ủ nhiệt chân không Fastform 00-00012990****Bảng 3.4. Các thông số kỹ thuật của máy ủ nhiệt chân không**

Mã máy	00-00012990
Nhiệt độ hoạt động tối đa	1200 °C đến 1350 °C
Mức chân không	$10^{-4}$ đến $10^{-6}$ mbar
Độ đồng nhất nhiệt độ	$\pm 5$ °C

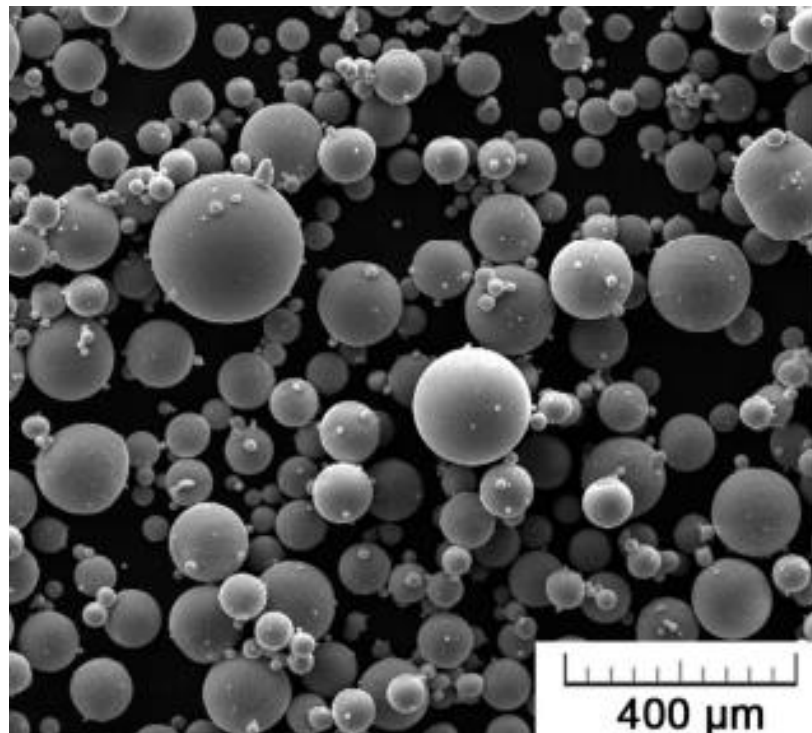
Các chi tiết được sản xuất bằng công nghệ nóng chảy laser chọn lọc (SLM) tồn tại ứng suất dư do nhiệt độ cao và quá trình nguội nhanh trong quá trình in. Lò xử lý nhiệt chân không cho phép khử ứng suất dư do nhiệt nhằm tránh hiện tượng cong vênh sản phẩm khi cắt khỏi tấm nền.



*Hình 3.6. Ví dụ về biến dạng mẫu in khi cắt khối tấm nền*

### **3.1.5. Vật liệu thí nghiệm - Bột in Ti6Al4V**

Vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V có phân bố kích thước hạt lớn trong khoảng từ 25  $\mu\text{m}$  đến 63  $\mu\text{m}$  được sử dụng để in các mẫu. Phân bố phần trăm kích thước đường kính hạt ( $d'$ ) như sau:  $d' \leq 25 \mu\text{m}$  chiếm 0.8%;  $d'$  trong khoảng từ 25  $\mu\text{m}$  đến 63  $\mu\text{m}$  chiếm 83.4%; và  $d' > 63 \mu\text{m}$  chiếm 15.8%. Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm được lấy trực tiếp từ công ty 3D HONY.



*Hình 3.7. Hình dạng bột Ti6Al4V [5]*

**Bảng 3.5. Các thông số vật liệu bột Ti6Al4V**

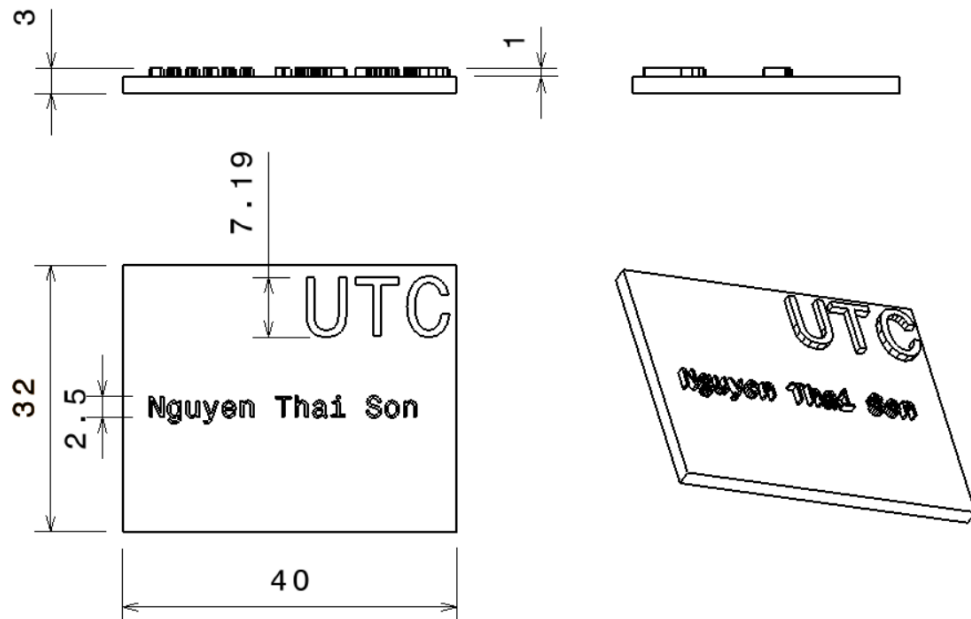
POWDER COMPOSITION (weight percent)				
Element	ASTM F136	Measured	Testing method	Status
Nitrogen, max.	0.05	0.02	ASTM E1409	Conforming
Carbon, max.	0.08	0.02	ASTM E1941	Conforming
Hydrogen, max.	0.012	0.002	ASTM E1447	Conforming
Iron, max.	0.25	0.20	ASTM E2371	Conforming
Oxygen, max.	0.13	0.09	ASTM E1409	Conforming
Aluminum, range	5.5 - 6.50	6.39	ASTM E2371	Conforming
Vanadium, range	3.5 - 4.5	3.9	ASTM E2371	Conforming
Titanium	Balance	Balance	ASTM E2371	Conforming

Chemical analysis laboratory: Luvak Inc. (722 Main Street, P.O. Box 597, Boylston MA, 01505)

POWDER CHARACTERIZATION			
Description	Required	Measured	Status / Comments
<b>Particle size distribution per ASTM B214</b>			
<b>Particle Size (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>% By Mass</b>	<b>% By Mass</b>	
> 63	Max. 5.0	0.8	Conforming
$\leq 63 > 25^*$	Not specified	83.4*	NA
$\leq 25^*$	Not specified	15.8*	NA
*Standard ASTM B214 applies to powder sizes 45 microns and higher. The results are for information only.			
<b>Particle size distribution per ASTM B822 (Coulter® LS Particle Size Analyzer)</b>			
D <sub>10</sub>	Not specified	23 $\mu\text{m}$	NA
D <sub>50</sub>	Not specified	43 $\mu\text{m}$	NA
D <sub>90</sub>	Not specified	59 $\mu\text{m}$	NA
< 20 $\mu\text{m}$	Not specified	5 % by volume	NA
<b>Flow Rate per ASTM B213</b>			
Flow Rate (sec. for 50 g)	Not specified	27	NA
<b>Apparent Density per B212</b>			
Apparent Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Not specified	2.51	NA

**3.1.6. Mẫu thí nghiệm**

Hình dạng và kích thước của các mẫu in được thể hiện ở Hình 3.8. Kích thước của mẫu (dài x rộng x cao) lần lượt là 40x32x3 (mm).

**Hình 3.8. Kích thước và hình dạng mẫu thí nghiệm**

## **3.2. Thiết bị đánh giá chất lượng sản phẩm in**

### **3.2.1. Các thiết bị và phần mềm sử dụng trong đánh giá độ chính xác hình học**

Các chỉ tiêu về hình học cần kiểm tra đối với sản phẩm in 3D bao gồm độ thẳng, độ tròn, độ nhám, và kích thước.

#### **3.2.1.1. Độ thẳng, độ tròn và độ nhám**

Các tiêu chuẩn được phát triển để hướng dẫn đo độ thẳng, độ tròn và độ nhám của một chi tiết như sau:

- ISO 12780 Thông số kỹ thuật hình học của sản phẩm (GPS)-độ thẳng. Tiêu chuẩn này thảo luận về khái niệm độ thẳng, thuộc về một trong các thông số kỹ thuật hình học của sản phẩm.
- ISO 12181 Thông số kỹ thuật hình học của sản phẩm (GPS)-độ tròn. Tiêu chuẩn này thảo luận về khái niệm độ tròn, thuộc về một trong các thông số kỹ thuật sản phẩm hình học.
- ASTM D7127 Phương pháp thử tiêu chuẩn để đo độ nhám bề mặt của bề mặt kim loại được làm sạch. Tiêu chuẩn này mô tả cách sử dụng thích hợp máy đo độ nhám bề mặt để đánh giá thông số bề mặt.

#### **3.2.1.2. Độ chính xác kích thước, hình dạng hình học**

Ngoài các thiết bị đo lường truyền thống như thước cặp, đồng hồ so...Ngày nay nhiều thiết bị quét 3D đã được ứng dụng hiệu quả. Các thiết bị này sử dụng phương pháp đo tiếp xúc hoặc phương pháp đo không tiếp xúc. Các thiết bị sử dụng phương pháp đo tiếp xúc như tay máy, máy đo tọa độ CMM, máy gia công CNC (computer numerical control). Có hai kiểu thu nhận dữ liệu với phương pháp đo tiếp xúc:

3- Điểm tới điểm

4- Quét tuần tự

Với kỹ thuật quét điểm tới điểm, một đầu dò được đặt trên máy CMM hoặc tay máy để đo một số điểm gốc trên bề mặt cần đo. Việc sử dụng tay máy cho phép thao tác tay với độ linh hoạt cao hơn khi di chuyển đầu đo so với máy CMM. Máy CMM cho phép lập trình các đường đo trên bề mặt cần đo. CMM cho kết quả đo

chính xác hơn so với tay máy, tuy vậy CMM bị giới hạn khi đo các bề mặt phức tạp do đầu đo bị khống chế về số bậc tự do hơn so với tay máy.

Với kỹ thuật quét tuần tự, đầu dò được đặt trên máy CMM hoặc máy CNC. Đầu dò tiếp xúc với bề mặt cần đo và di chuyển liên tục dọc bề mặt chính vì vậy thu nhận dữ liệu liên tục. Tốc độ quét nhanh gấp ba lần kỹ thuật quét điểm tới điểm.

Các thiết bị sử dụng kỹ thuật đo tiếp xúc có ưu điểm về độ chính xác cao, giá thành thấp, có thể đo rãnh sâu, đo hốc. Tuy vậy, kỹ thuật đo này có tốc độ thu nhận dữ liệu thấp, có thể phá hỏng vật mẫu đặc biệt là những vật mẫu mềm do có sự tiếp xúc trực tiếp của đầu dò lên vật mẫu.

**Bảng 3.6. Một số máy theo phương pháp đo tiếp xúc [52, 53, 54]**

Công nghệ	Hãng sản xuất	Mẫu máy	Độ chính xác, tốc độ quét	Thao tác
Điểm tới điểm	Faro	Tay máy (FaroArm)	Độ chính xác: $\pm 0.09$ tới $\pm 0.431$ mm	Tay
	Immersion	MicroScribe MX	Độ chính xác: 0.101 mm	Tay
Quét tuần tự với đầu dò lắp trên máy CNC	RolandDGA	MDX-20	Bước quét theo X,Y: 0.05 đến 5 mm, theo trục Z: 0.025 mm	Chương trình
Điểm tới điểm với đầu dò lắp trên máy CMM	Mitutoyo	Euro C-121210	Độ chính xác: 0.001 mm	Chương trình
Quét tuần tự với đầu dò lắp trên máy CMM, máy CNC	Renishaw	Renscan 200	Tốc độ: 508 đến 1016 mm/phút Tốc độ thu nhận dữ liệu lớn nhất: 70 điểm/giây	Chương trình

Các thiết bị sử dụng phương pháp đo không tiếp xúc sử dụng nguồn năng lượng như ánh sáng, âm thanh, hoặc trường từ tính để tác động tới đối tượng đo. Các thiết bị đo không tiếp xúc được phân loại dựa trên kỹ thuật thu nhận dữ liệu.

Các thiết bị đo không tiếp xúc có các ưu điểm như không làm hỏng bề mặt vật đo hoặc đầu đo do loại bỏ được tiếp xúc trực tiếp, số hóa nhanh và độ chính xác cao.

**Bảng 3.7. Một số máy theo phương pháp đo không tiếp xúc [52, 53, 54]**

Công nghệ	Hãng sản xuất	Mẫu máy	Kích thước quét (mm <sup>3</sup> )	Độ chính xác (mm)
Laser	Cyberware	3030RGB	260x340x300	0.25÷1.0
Laser	Cyberware	3030RGB MS	1000x260x300	0.25÷1.0
Laser	Konica Minolta	VIVID 910	355x266x92	0.1÷0.22

### 3.2.1.3. Phần mềm sử dụng trong quét 3D:

Trên thế giới hiện nay, phần mềm sử dụng xử lý dữ liệu sau quét 3D rất nhiều và đa dạng, đó có thể là phần mềm đi kèm theo thiết bị có chức năng sửa chữa và chuyển đổi dữ liệu hoặc có thể là phần mềm độc lập với thiết bị. Phần mềm độc lập với thiết bị hiện nay có rất nhiều như: rapid form, geomagic, các modul thiết kế ngược của CATIA, NX.

#### a. Phần mềm Rapid Form

Rapid Form Xo Redesign (XOR) là phần mềm thiết kế ngược của hãng Rapid Form (Hàn Quốc). Đây là một giải pháp phần mềm hoàn chỉnh xử lý dữ liệu từ dữ liệu quét tới mô hình CAD. Rapid Form (XOR) thực hiện một quy trình tạo các mô hình CAD tham số từ các chi tiết thực một cách nhanh chóng và dễ dàng bằng một quy trình thiết kế và giao diện quen thuộc với người sử dụng CAD.

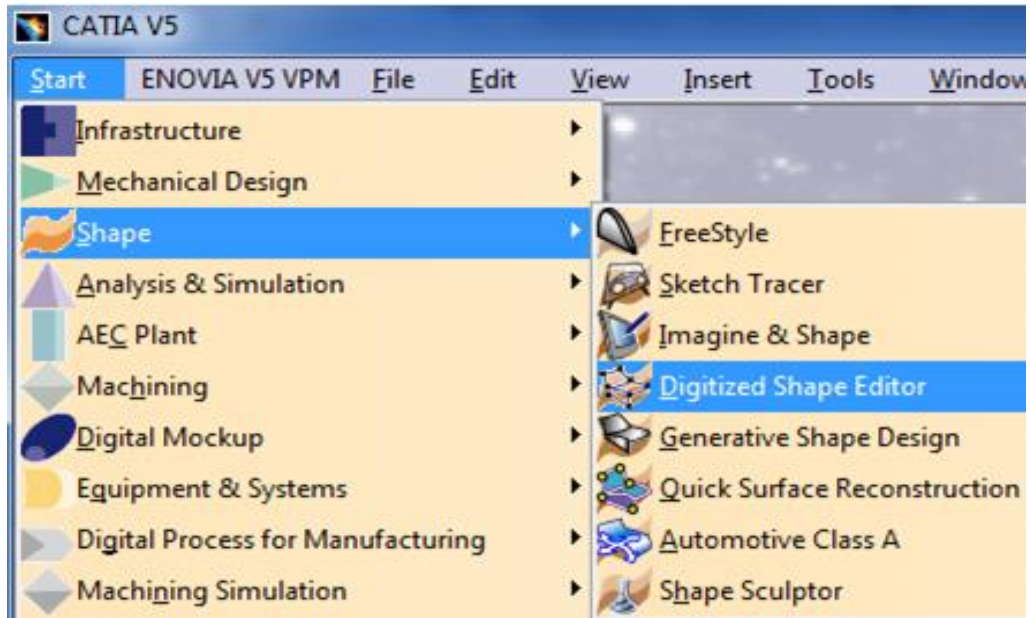
#### b. Phần mềm geomagic

Phần mềm Geomagic Studio sử dụng dữ liệu quét 3D để tạo ra mô hình chính xác như sản phẩm ban đầu. Ngoài ra, từ dữ liệu quét 3D, có thể thay đổi theo ý tưởng thiết kế mới nhằm tái tạo một hay nhiều các hình dạng phức tạp một cách nhanh chóng và dễ dàng. Geomagic Studio tích hợp được với tất cả các máy quét 3D và phần mềm CAD/CAM. Tính năng tự động và đơn giản hóa quy trình làm việc giúp giảm tối đa thời gian và tiết kiệm chi phí.

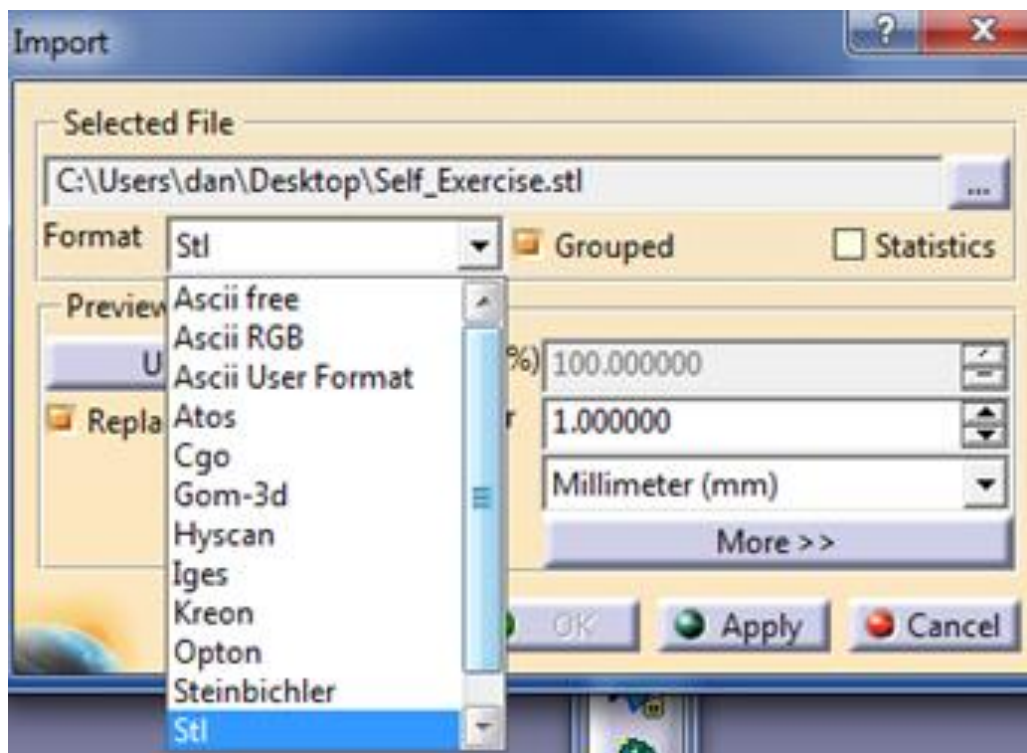
c. Modul thiết kế ngược trong phần mềm CATIA

Có 2 modul sử dụng trong thiết kế ngược bao gồm:

❖ **Digitized shape editor**



*Hình 3.9. Modul Digitized shape editor*



*Hình 3.10. Mở định dạng dữ liệu STL*

## ❖ Quick surface reconstruction



*Hình 3.11. Mô đun tái tạo nhanh bề mặt*

### 3.2.2. Thiết bị đánh giá tính chất cơ học của mẫu in

Các đặc tính vật liệu trong sản xuất bồi đắp thường có trong các bảng dữ liệu do nhà sản xuất cung cấp, cũng như từ các thử nghiệm riêng lẻ. Các đặc tính cơ học của các chi tiết in cho phép các kỹ sư lựa chọn vật liệu phù hợp cho các ứng dụng khác nhau. Tùy thuộc vào các đặc trưng cơ học cần xem xét để lựa chọn các thiết bị thí nghiệm phù hợp.

### 3.2.3. Thiết bị đo

#### 3.2.3.1. Máy scan 3D

Để đánh giá độ biến dạng hình học của chi tiết in, máy scan 3D Handy Silver của hãng Creaform được sử dụng để đo kiểm tại công ty 3D Master (Hình 3.12).



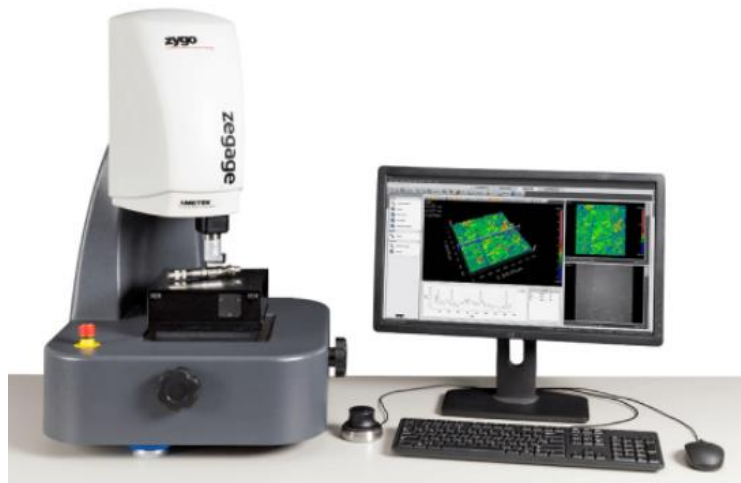
*Hình 3.12. Thiết bị đo biến dạng hình học Scan 3D Handy Silver của hãng Creaform*

**Bảng 3.8. Các thông số kỹ thuật của máy Scan 3D Handy Silver**

Mã máy	HandySCAN SILVER
Độ chính xác	0.025 mm
Độ chính xác đo thể tích (phụ thuộc vào kích thước mẫu)	0.02 mm + 0.04 mm/m
Độ phân giải đo lường	0.025 mm
Độ phân giải lưới	0.1 mm
Tốc độ đo	1.300.000 lần/giây
Tiết diện quét	310*350 mm

**3.2.3.2. Máy kiểm tra độ nhám**

Để đánh giá độ nhám của chi tiết in, máy đo 3D bằng giao thoa ánh sáng trắng Zygo ZeGage Pro HR, Mỹ được sử dụng để đo kiểm tại học viện kỹ thuật quân sự (Hình 3.13).

**Hình 3.13. Thiết bị đo độ nhám Zygo Zegage Pro HR****Bảng 3.9. Các thông số kỹ thuật của máy Zygo Zegage Pro HR**

Mã máy	Zygo Zegage Pro HR
Kích thước máy	82*53*53 cm
Trọng lượng máy	54 kg
Độ phân giải dọc	$\leq 0.15$ nm
Phạm vi quét dọc tối đa	$\leq 20$ mm
Tốc độ quét dữ liệu tối đa	$\leq 171$ $\mu\text{m/s}$
Độ phân giải ngang quang học	0.52 $\mu\text{m}$ (với vật kính 50X)

### 3.2.3.3. Máy kiểm tra cấu trúc tế vi

Để đánh giá tổ chức tế vi và độ xốp của vật liệu chi tiết in, thiết bị đo FESEM S4800 HITACHI, Nhật bản (Cty TƯ VẤN HCM VINAUCARE) được sử dụng để đo kiểm (Hình 3.14).



**Hình 3.14. Thiết bị đo FESEM S4800 HITACHI**

**Bảng 3.10. Các thông số kỹ thuật của máy FESEM S4800 HITACHI**

Mã máy	FESEM S4800 HITACHI
Loại bàn mẫu	Bàn mẫu 5 trục
Hành trình XY	110x110 mm
Kích thước mẫu tối đa	Đường kính tối đa 150 mm
Góc nghiêng	-5° đến +70°
Xoay	360°
Độ phân giải	1 nm
Độ phóng đại	Kiểu phóng đại thấp: 20X đến 2,000X Kiểu phóng đại cao: 100X đến 800,000X

#### 3.2.3.4 Nguyên lý đo độ xốp tế vi của thiết bị FESEM S4800 HITACHI

Thiết bị đo độ xốp FESEM S4800 HITACHI là thiết bị đo độ xốp tiên tiến, trên thiết bị được tích hợp phần mềm chuyên dụng để xác định độ xốp của mẫu thử. Khi mẫu thử được kiểm tra, lớp phủ được phóng to tới hàng nghìn lần. Đồng thời phần mềm xác định độ xốp của lớp phủ tính bằng tỷ lệ % so với tổng thể tích lớp phủ. Lớp phủ được đánh giá đạt chất lượng khi độ xốp đạt từ 3-5% tùy theo yêu cầu chất lượng của lớp phủ càng nhỏ càng tốt

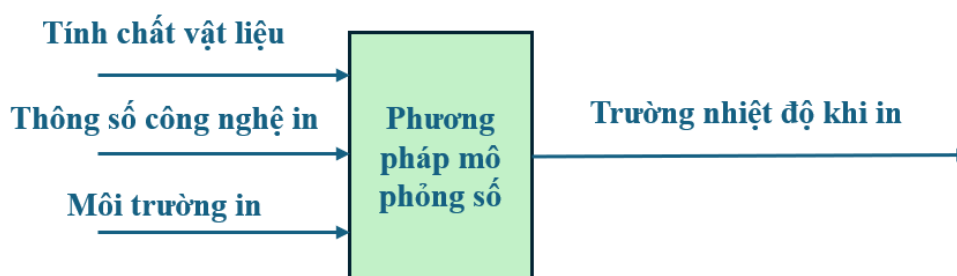
### 3.3. Phương pháp nghiên cứu

#### 3.3.1. Phương pháp mô phỏng

Sản xuất bồi đắp là một quá trình phức tạp liên quan đến các hiện tượng và cơ chế vật lý, hóa học ở các mức độ và quy mô khác nhau của chi tiết được chế tạo. Những hiện tượng và cơ chế này, bao gồm năng lượng, truyền nhiệt, cơ chế nóng chảy và động lực học của vũng nóng chảy, quá trình đông đặc và sự hình thành của cấu trúc vi mô, phải được hiểu và kiểm soát.

Mô hình hóa và mô phỏng số đã được chứng minh là một công cụ hiệu quả cho phép thực hiện các thí nghiệm ảo để hiểu rõ hơn các khía cạnh vật lý đa cấp và đa quy mô này, cũng như một cách hiệu quả về chi phí để tối ưu hóa các thông số quy trình công nghệ và các thuộc tính cơ lý của chi tiết in, nhằm chế tạo các chi tiết đạt tiêu chuẩn cho mục đích sử dụng công nghiệp.

Trong nghiên cứu này, với mô hình nhiệt được thiết lập có xét đến tính chất vật liệu, thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in, và điều kiện môi trường in, kết quả của mô phỏng số là trường nhiệt độ khi in (như thể hiện trên Hình 3.15). Bộ thông số công nghệ in được xem là phù hợp cho quá trình in khi tạo ra trường nhiệt độ trong khoảng lớn hơn nhiệt độ chảy của vật liệu và nhỏ hơn nhiệt độ bay hơi của vật liệu in.



Hình 3.15. Các thông số đầu vào và đầu ra của mô phỏng số

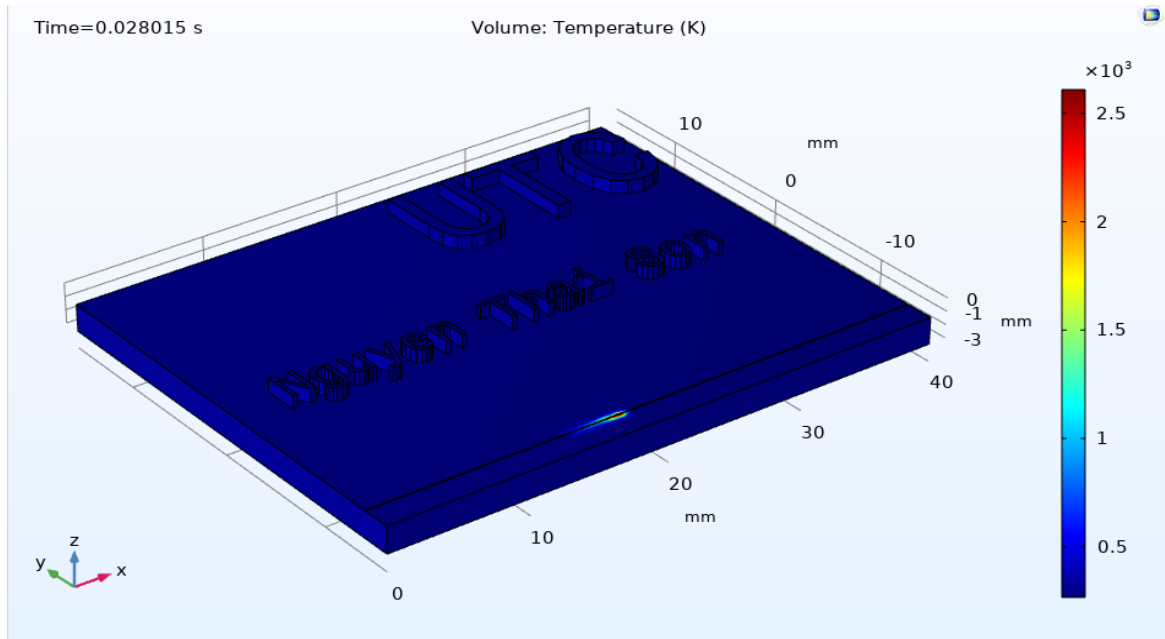
Trong nghiên cứu này, để xác định trường nhiệt độ khi in, vì tính chất lặp lại của các đường in nên chỉ nghiên cứu quá trình in một đường đơn. Bảng 3.11 thể hiện các giá trị được sử dụng để xác định trường nhiệt với mô hình phân bố nhiệt Gauss.

**Bảng 3.11. Giá trị của các thông số mô phỏng [101, 102]**

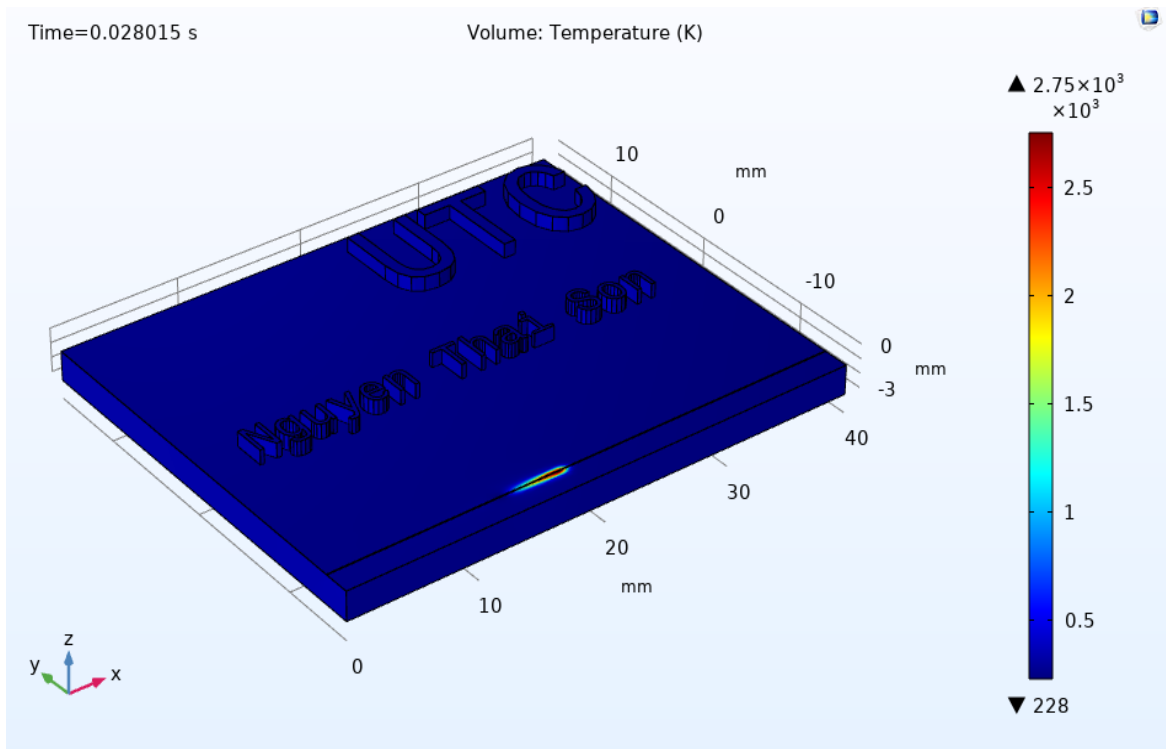
Ký hiệu	Thông số	Mô hình Gauss
$x_0$	Tọa độ x ban đầu	0 [mm]
$y_0$	Tọa độ y ban đầu	0 [mm]
$U$	Công suất nguồn laser từ máy	150 [W]
$a$	Chiều rộng chùm tia laser theo trục y, x	0.4205[mm]
$b$	Chiều sâu thâm nhập của chùm tia laser theo trục z	0.1682[mm]
$V$	Vận tốc in	400 [mm/s]
$C$	Nhiệt dung	$710 \cdot 10^{-3}$ [J/(g.K)]
$k$	Hệ số dẫn nhiệt	$7.5 \cdot 10^{-3}$ [W/(mm.K)]
$T_a$	Nhiệt độ môi trường	293 [K]
$h_c$	Hệ số truyền nhiệt đối lưu	186.3[W/(mm <sup>2</sup> .K)]
$h_r$	Hệ số truyền nhiệt bức xạ	4.4[W/(mm <sup>2</sup> .K)]
$t$	Chiều dày lớp in	0.045[mm]
$Ha$	Khoảng cách giữa hai đường in	0.08[mm]

Xét các trường hợp với sự thay đổi công suất nguồn laser, vận tốc in; giữ nguyên giá trị chiều dày lớp in  $t = 0.045\text{mm}$ , các kết quả về phân bố nhiệt đạt được như sau:

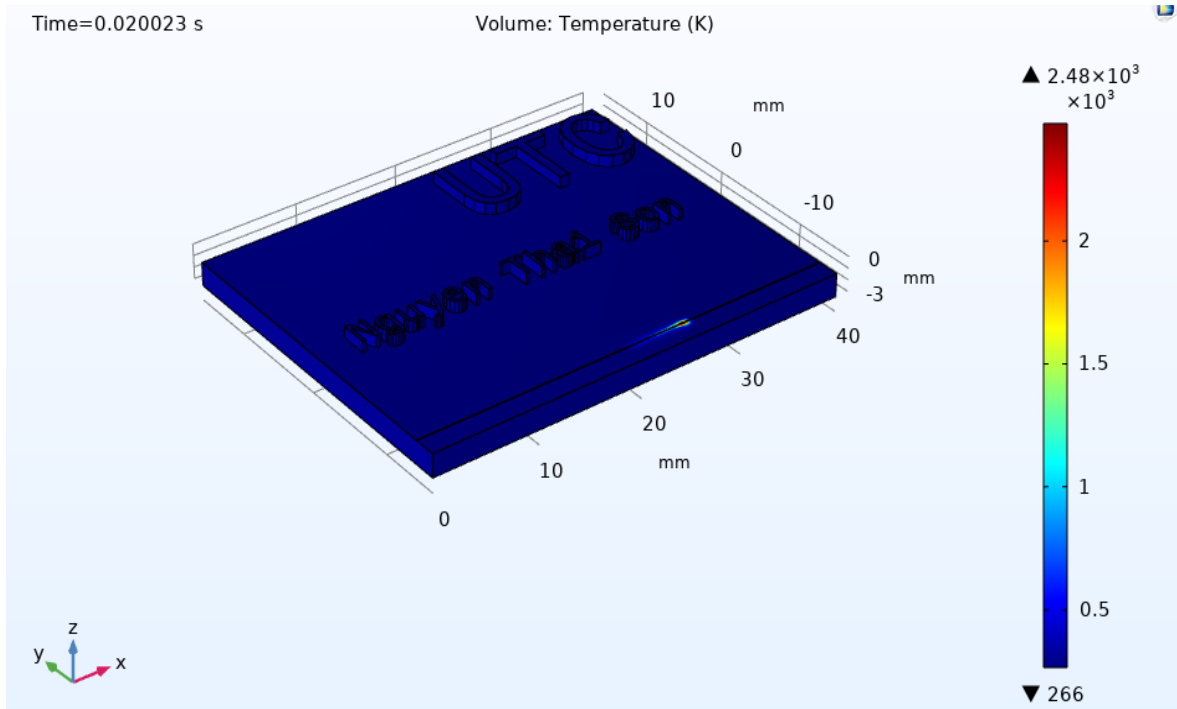
**Trường hợp 1:** Công suất nguồn laser  $U = 150\text{ W}$ ; vận tốc in  $V = 400\text{ mm/s}$ ; chiều dày lớp in  $t = 0.045\text{ mm}$ . Giá trị nhiệt độ in đạt được lớn nhất là  $2610\text{ K}$ .



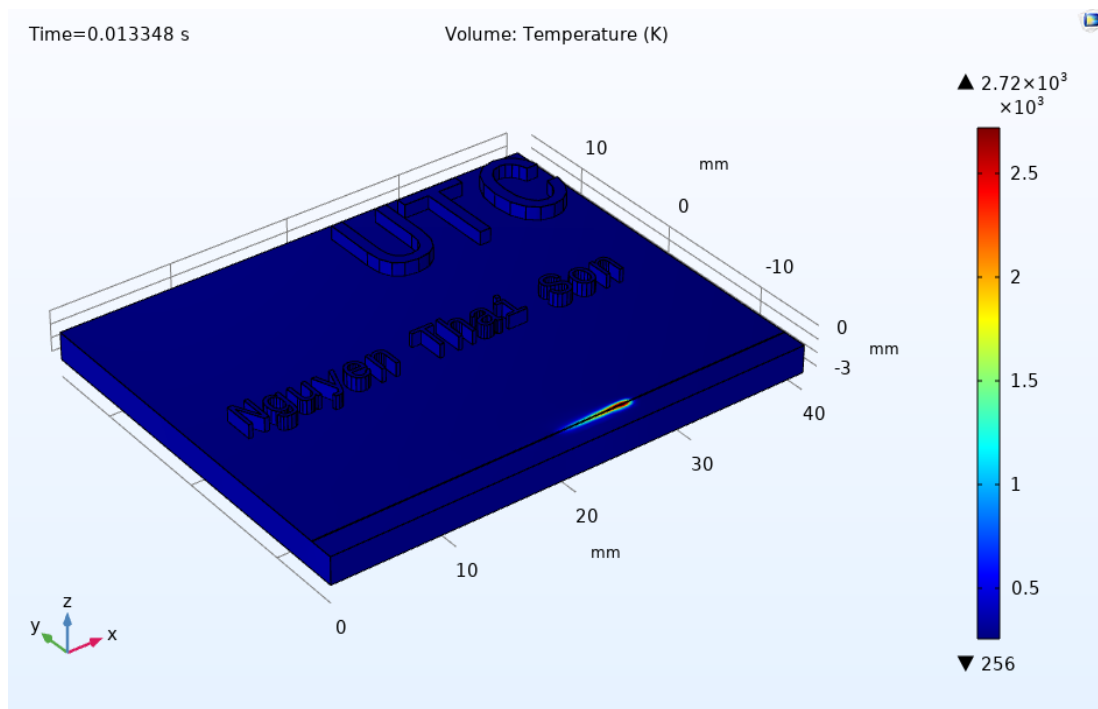
**Trường hợp 2:** Công suất nguồn laser  $U = 350 \text{ W}$ ; vận tốc in  $V = 400 \text{ mm/s}$ ; chiều dày lớp in  $t = 0.045 \text{ mm}$ . Giá trị nhiệt độ in đạt được lớn nhất là  $2610 \text{ K}$ . Giá trị nhiệt độ in đạt được lớn nhất là  $2750 \text{ K}$ .



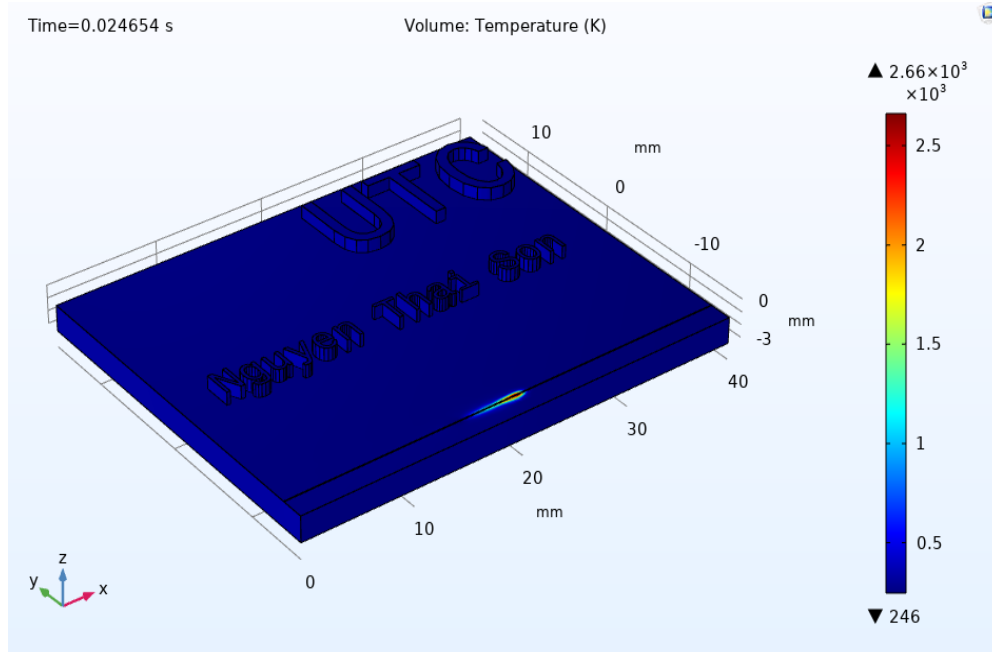
**Trường hợp 3:** Công suất nguồn laser  $U = 150 \text{ W}$ ; vận tốc in  $V = 1500 \text{ mm/s}$ ; chiều dày lớp in  $t = 0.045 \text{ mm}$ . Giá trị nhiệt độ in đạt được lớn nhất là  $2480 \text{ K}$ .



**Trường hợp 4:** Công suất nguồn laser  $U = 350 \text{ W}$ ; vận tốc in  $V = 1500 \text{ mm/s}$ ; chiều dày lớp in  $t = 0.045 \text{ mm}$ . Giá trị nhiệt độ in đạt được lớn nhất là  $2720 \text{ K}$ .



**Trường hợp 5:** Công suất nguồn laser  $U = 250 \text{ W}$ ; vận tốc in  $V = 950 \text{ mm/s}$ ; chiều dày lớp in  $t = 0.045 \text{ mm}$ . Giá trị nhiệt độ in đạt được lớn nhất là  $2660 \text{ K}$ .



Với 5 trường hợp xét ở trên, các bộ thông số công nghệ in khác nhau (trong trường hợp nghiên cứu này chỉ thay đổi công suất nguồn laser và vận tốc in), giá trị của nhiệt độ khi in ( $T_m$ ) đạt được thể hiện ở Bảng 3.12. Trong đó với công suất nguồn laser 150 W, giá trị của chiều sâu thâm nhập của chùm laser là 1.682 mm (như thể hiện ở Bảng 3.11); với công suất nguồn lớn hơn, giá trị của chiều sâu thâm nhập của chùm laser sẽ lớn hơn. Cụ thể, với công suất nguồn laser là 250 W giá trị của  $b = 0.35$  mm; với công suất nguồn laser là 350 W giá trị của  $b = 0.5$  mm đã được sử dụng cho quá trình mô phỏng.

**Bảng 3.12. Giá trị nhiệt độ tại vùng nóng chảy ( $T_m$ ) với mô hình Gauss**

STT	Nguồn laser (W)	Vận tốc in (mm/s)	Mô hình Gauss $T_m$ (K)
1	150	400	2610
2	350	400	2750
3	150	1500	2480
4	350	1500	2720
5	250	950	2660

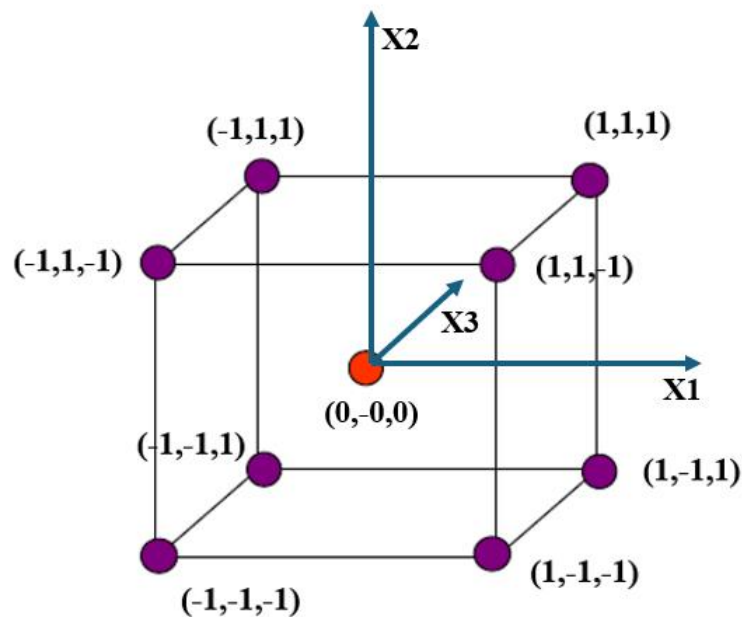
Từ kết quả Bảng 3.12 nhận thấy rằng, với công suất nguồn laser 150 W, 250 W, và 350 W; vận tốc in 400 mm/s, 950 mm/s, và 1500 mm/s giá trị trường nhiệt độ áp dụng mô hình Gauss đều lớn hơn nhiệt độ chảy yêu cầu của vật liệu hợp kim Titan là 1877 K [79, 80].

### 3.3.2 Phương pháp thực nghiệm

Phương pháp thiết kế thí nghiệm DOE (Design of experiments) được sử dụng phổ biến nhất là thiết kế thực nghiệm nhân tố toàn phần. Thực nghiệm mà khi đó số mức thay đổi các tất cả các nhân tố như nhau, và tất cả sự tổ hợp này đều được sử dụng để nghiên cứu gọi là thực nghiệm nhân tố toàn phần. Trong lý thuyết quy hoạch thực nghiệm thì thực nghiệm nhân tố toàn phần có rất nhiều ưu điểm so với các dạng quy hoạch khác như ước lượng độc lập các hệ số phương trình hồi quy; phương sai chính là nhỏ nhất; và xử lý kết quả thực nghiệm đơn giản nhất. Với số mức thay đổi nhân tố là 2 (giá trị tối thiểu và giá trị tối đa của các nhân tố), và số nhân tố là  $k$  thì số thí nghiệm chính phải thực hiện là  $N = 2^k$  [81]. Mặt khác, để kiểm tra tính phi tuyến tính của hàm đáp ứng  $y$ , 01 thí nghiệm trung tâm được bổ sung thêm [82]. Hình 3.16 thể hiện không gian thiết kế thí nghiệm 3 nhân tố với hai mức đầy đủ có tổng số thí nghiệm là 9. Theo kết quả thực nghiệm nhân tố toàn phần  $2^k$  ta có thể nhận được phương trình hồi quy bậc 1 như sau:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \sum b_{ij}x_ix_j \quad (3.1)$$

Trong phương trình trên có xét tới ảnh hưởng của đơn nhân tố cũng như ảnh hưởng tương tác giữa các nhân tố tới hàm đầu ra  $y$ .



Hình 3.16. Thiết kế thí nghiệm 3 nhân tố với hai mức đầy đủ [81, 83]

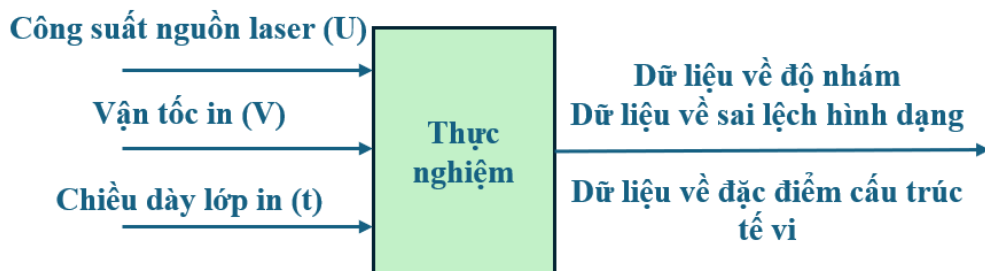
Đặc điểm trong xây dựng thực nghiệm nhân tố toàn phần: đầu tiên cần chọn miền giá trị các nhân tố. Giả sử đối với nhân tố  $X_1$  ta chọn miền  $X_{1\min} \leq X_1 \leq X_{1\max}$  và đối với nhân tố  $X_2$ :  $X_{2\min} \leq X_2 \leq X_{2\max}$ ; trong thực nghiệm nhân tố toàn phần  $2^k$  mỗi nhân tố đều thay đổi ở 2 mức – mức cao nhất và thấp nhất. Với bảng thiết kế thí nghiệm nhân tố toàn phần mã hóa như thể hiện ở Bảng 3.13.

**Bảng 3.13. Thực nghiệm toàn phần với 3 nhân tố dạng mã hóa**

N	Nhân tố tự nhiên			Nhân tố mã hóa			Kết quả thực nghiệm
	$X_{1\min}$	$X_{2\min}$	$X_{3\min}$				
1	$X_{1\min}$	$X_{2\min}$	$X_{3\min}$	-1	-1	-1	$y_1$
2	$X_{1\max}$	$X_{2\min}$	$X_{3\min}$	+1	-1	-1	$y_2$
3	$X_{1\min}$	$X_{2\max}$	$X_{3\min}$	-1	+1	-1	$y_3$
4	$X_{1\max}$	$X_{2\max}$	$X_{3\min}$	+1	+1	-1	$y_4$
5	$X_{1\min}$	$X_{2\min}$	$X_{3\max}$	-1	-1	+1	$y_5$
6	$X_{1\max}$	$X_{2\min}$	$X_{3\max}$	+1	-1	+1	$y_6$
7	$X_{1\min}$	$X_{2\max}$	$X_{3\max}$	-1	+1	+1	$y_7$
8	$X_{1\max}$	$X_{2\max}$	$X_{3\max}$	+1	+1	+1	$y_8$
9	$X_{1tb}$	$X_{2tb}$	$X_{3tb}$	0	0	0	$y_9$

Trong đó với thí nghiệm trung tâm (thí nghiệm 9), giá trị của các nhân tố là trung bình cộng của hai mức của mỗi nhân tố.

Trong nghiên cứu này, với 3 thông số đầu vào là công suất nguồn laser, vận tốc in và chiều dày lớp in, có 9 thí nghiệm đã được thực hiện với các dữ liệu đầu ra của thực nghiệm là dữ liệu về độ nhám, dữ liệu về sai lệch hình dạng, và dữ liệu về đặc điểm cấu trúc tế vi (Hình 3.17).



**Hình 3.17. Các nhân tố đầu vào và hàm đầu ra của thực nghiệm**

### KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Thông qua mô phỏng số, nghiên cứu đã xác định được dải thông số công nghệ đầu vào an toàn, đáp ứng chính xác yêu cầu về nhiệt độ chuyển pha của vật liệu. Việc chuẩn bị đồng bộ dải thông số này cùng hệ thống thiết bị chế tạo và đo lường chính là tiền đề vững chắc để triển khai thực nghiệm đánh giá chất lượng sản phẩm ở Chương 4. Cụ thể:

- 1- Quy trình thiết kế thí nghiệm 3 nhân tố với giá trị giới hạn của các thông số đầu vào như sau:

$$150 \leq \text{Công suất nguồn laser} \leq 350 \text{ (W)}$$

$$400 \leq \text{Vận tốc in} \leq 1500 \text{ (mm/s)}$$

$$0.03 \leq \text{Chiều dày lớp in} \leq 0.06 \text{ (mm)}$$

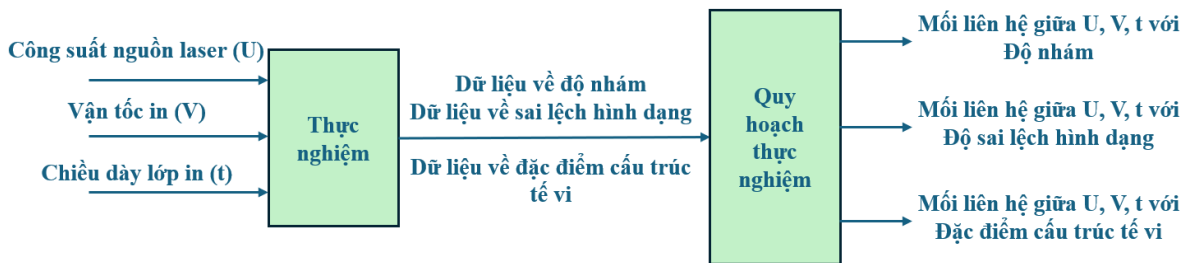
- 2- Thông qua phương pháp mô phỏng số, bộ thông số công nghệ trên là phù hợp bởi cho giá trị của trường nhiệt độ khi in bởi giá trị nhiệt sinh ra lớn nhất lớn hơn nhiệt độ chảy và nhỏ hơn nhiệt độ sôi của vật liệu Ti6Al4V.
- 3- Hệ thống thiết bị bao gồm thiết bị tạo mẫu in và thiết bị xử lý dữ liệu sau in đã được xác định đảm bảo thực hiện được các phương án thí nghiệm và xử lý kết quả thí nghiệm.

## CHƯƠNG 4

### THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN CÁC CHỈ TIÊU CHẤT LƯỢNG KHI IN SLM

#### 4.1. Đặt vấn đề

Từ cơ sở lý thuyết và hệ thống thiết bị hiện có, thiết kế thí nghiệm và tiến hành thí nghiệm. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm sử dụng nhằm xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ: công suất nguồn laser (U), vận tốc in (V), chiều dày lớp in (t) tới quá trình tối ưu hóa theo phương pháp đơn mục tiêu và đa mục tiêu về chất lượng sản phẩm in 3D. Các bước được mô tả trên Hình 4.1



**Hình 4.1. Các bước xác định mối liên hệ giữa thông số công nghệ với chỉ tiêu chất lượng**

Để xác định mối liên hệ giữa bộ thông số công nghệ U, V, t với chất lượng sản phẩm in bao gồm các chỉ tiêu về độ nhám, độ sai lệch hình dạng và đặc điểm cấu trúc tế vi, thực nghiệm và quy hoạch thực nghiệm đã được thực hiện. Các bước trong xác định mối liên hệ giữa thông số công nghệ với chỉ tiêu chất lượng được thể hiện trên Hình 4.1. Kết quả của bước thực nghiệm là dữ liệu đo được về độ nhám, độ sai lệch hình dạng và đặc điểm cấu trúc tế vi. Kết quả của quy hoạch thực nghiệm là xác định được ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới các chỉ tiêu chất lượng đầu ra.

#### 4.2. Thí nghiệm

##### 4.2.1. Mục tiêu thí nghiệm

Nghiên cứu thực nghiệm đã được tiến hành nhằm xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in đến các chỉ tiêu đầu ra bao gồm độ sai lệch hình dạng, độ nhám bề mặt, cấu trúc tế vi của chi tiết được in trên máy in SLM với vật liệu bột Ti6Al4V.

#### 4.2.2. Thiết kế thí nghiệm

Trong nghiên cứu này 3 thông số công nghệ được sử dụng để nghiên cứu đó là: Công suất nguồn laser (W); vận tốc in (mm/s), chiều dày lớp in (mm). Các thông số công nghệ còn lại được lựa chọn cố định theo cài đặt của nhà sản xuất thiết bị. Để đánh giá ảnh hưởng các thông số quá trình đến chất lượng in, thí nghiệm 2 mức đầy đủ với 3 yếu tố được dùng để thiết kế thí nghiệm. 8 mẫu thí nghiệm và 01 thí nghiệm trung tâm được thiết kế theo Hình 3.8 đã được thực hiện với các giá trị thay đổi của bộ 03 thông số nêu trên. Thiết kế thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 4.1.

**Bảng 4.1. Bộ thông số công nghệ in SLM**

STT	Công suất nguồn laser (W)	Vận tốc in (mm/s)	Chiều dày lớp in (mm)
1	150	400	0.03
2	350	400	0.03
3	150	1500	0.03
4	350	1500	0.03
5	150	400	0.06
6	350	400	0.06
7	150	1500	0.06
8	350	1500	0.06
9	250	950	0.045

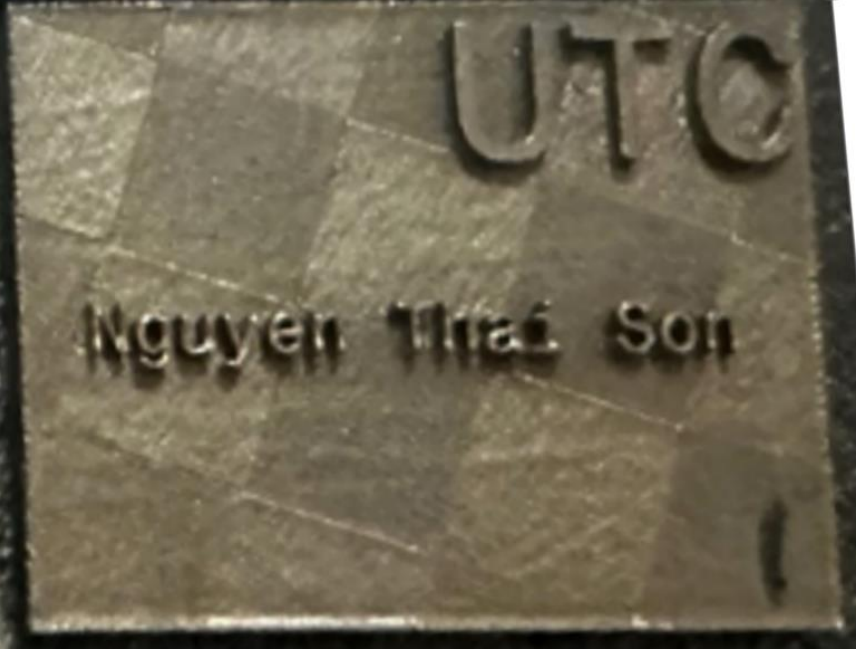
#### 4.2.3. Tiến hành thí nghiệm

##### 4.2.3.1. In các mẫu

Trên cơ sở dữ liệu từ thiết kế thí nghiệm, các mẫu đã được in trên máy in 3D kim loại SLM FF-M180D. Bột hợp kim Ti6Al4V đã được sấy lên 200°C trước khi in. Để loại trừ các sai số ngẫu nhiên khi in và khi đo sản phẩm sau in, trong quá trình thực nghiệm thí nghiệm trung tâm đã được lặp lại 3 lần với kết quả đo độ sai lệch hình dạng tương ứng, sai số chênh lệch rất nhỏ (0.1 mm), từ đó chọn mẫu trung

tâm thứ nhất làm mẫu đo thứ 9. Kết quả in 9 mẫu thí nghiệm với 9 chế độ t, U, V khác được thể hiện như Bảng 4.2 và Phụ lục 2a.

**Bảng 4.2. Kết quả in mẫu trên máy in FF-M180D**

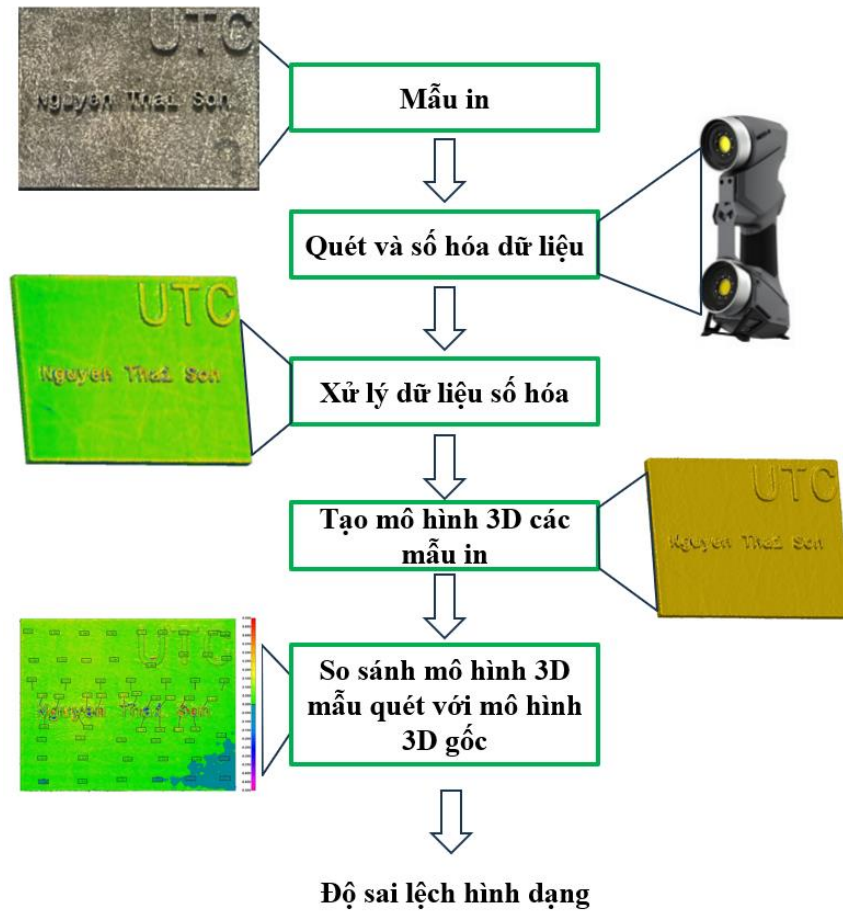
Chế độ in	Mẫu in
t = 0.03 mm U = 150 W V = 400 mm/s	

Các mẫu in sau khi in xong được tách khỏi tấm nền sử dụng máy cắt dây EDM.

#### 4.2.3.2. Các bước xác định độ sai lệch hình dạng

Để xác định độ sai lệch hình dạng của mẫu in, các mẫu in được quét 3D. Dữ liệu quét 3D của mỗi mẫu được so sánh với mô hình 3D CAD gốc ban đầu. Các bước xác định độ sai lệch hình dạng của mẫu in được thể hiện trên Hình 4.2.

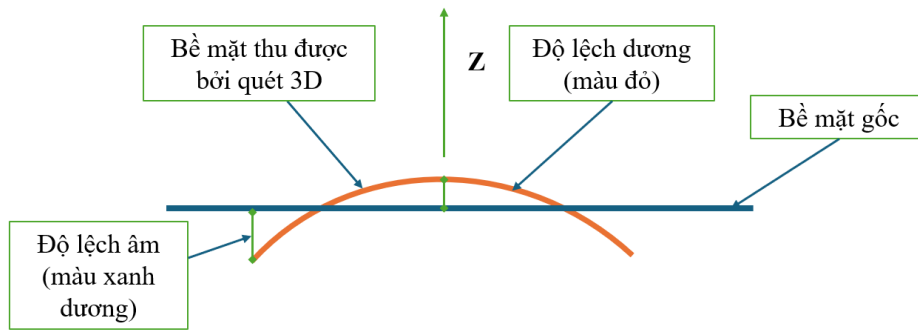
Để tạo mô hình 3D của các mẫu in, máy quét 3D HandySCAN với phương pháp quét 3D không tiếp xúc được sử dụng. Các mẫu in được quét; dữ liệu quét là một đám mây điểm. Phần mềm Geometric được sử dụng để xử lý dữ liệu đám mây điểm thành các bề mặt. Sau đó các bề mặt này được xử lý thành khối rắn để so sánh với mô hình ban đầu của mẫu in để xác định độ lệch hình dạng.



Hình 4.2. Các bước xác định độ sai lệch hình dạng

Bảng 4.3. Kết quả đo độ sai lệch hình dạng

Chế độ in	Mẫu đo
<p><math>t = 0.03 \text{ mm}</math>  <math>U = 150 \text{ W}</math>  <math>V = 400 \text{ mm/s}</math>  <math>D=0.319 \text{ mm}</math></p>	

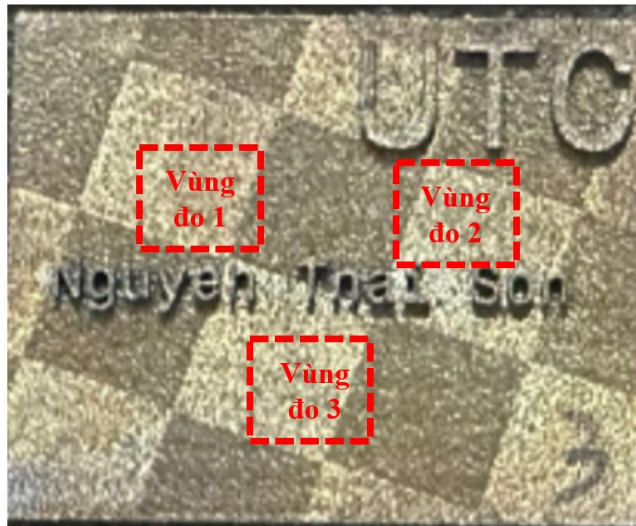


**Hình 4.3. Quy ước hiển thị màu của các sai số**

Các kết quả đo độ sai lệch hình dạng cho các mẫu được thể hiện ở Bảng 4.3, trong đó màu đỏ tương ứng với độ lệch dương (kích thước mẫu lớn hơn kích thước yêu cầu); màu xanh dương tương ứng với độ lệch âm (kích thước mẫu nhỏ hơn kích thước yêu cầu); và màu xanh lá cây tương ứng với độ lệch bằng không (kích thước mẫu bằng kích thước yêu cầu) như thể hiện ở Hình 4.3.

#### 4.2.3.3. Các bước đo độ nhám

Để xác định độ nhám của mẫu in, máy đo Zygo Zegage Pro HR tại Học viện Kỹ thuật quân sự đã được sử dụng, các bước để xác định độ nhám được thể hiện trên Hình 4.5. Nhằm tăng độ chính xác khi đo, mỗi mẫu in được đo tại 3 vùng đo, giá trị độ nhám được tính là giá trị trung bình tại 3 vùng đo này. Các vùng đo độ nhám của mỗi mẫu in như thể hiện trên Hình 4.4.

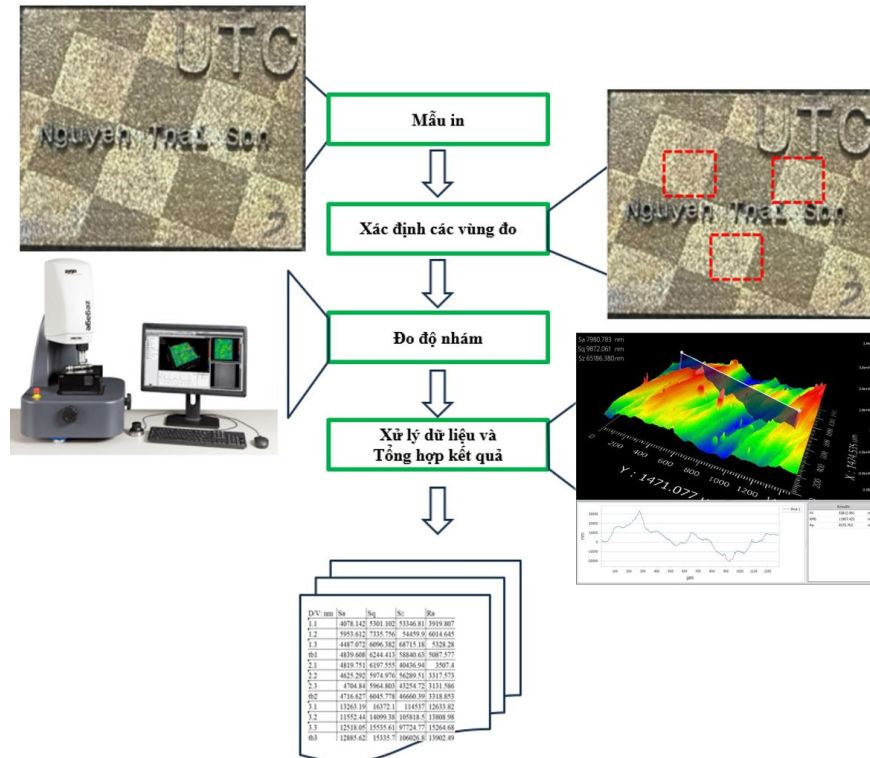


**Hình 4.4. Các vùng đo độ nhám**

Với mỗi mẫu in giá trị  $R_a$  được xác định như sau:

$$R_a = \frac{R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}}{3} \quad (4.1)$$

Trong đó  $R_{a1}$ ,  $R_{a2}$ ,  $R_{a3}$  tương ứng là giá trị độ nhám đo được tại các vùng 1, 2 và 3 của mỗi mẫu in.



**Hình 4.5. Các bước đo độ nhám**

Với 9 mẫu in, mỗi mẫu tiến hành đo tại 3 vùng khác nhau với các chỉ tiêu độ nhám gồm  $R_a$ ,  $S_a$  và  $S_z$ , như thể hiện tại Bảng 4.4 và Phụ lục 2c. Trong nghiên cứu này, chỉ tiêu  $R_a$  được sử dụng để đánh giá độ nhám của mẫu in.

**Bảng 4.4. Kết quả đo độ nhám**

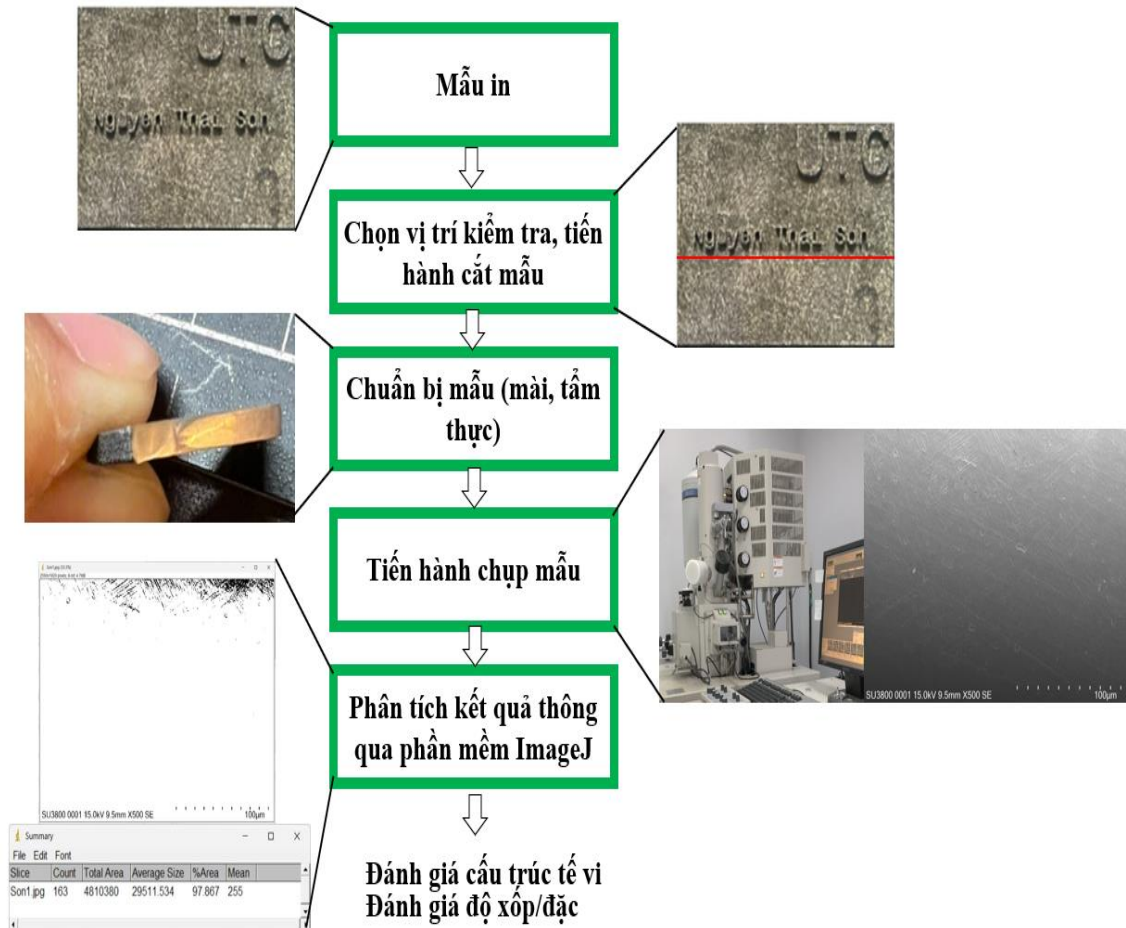
Chế độ in	Mẫu đo
$t = 0.06 \text{ mm}$ $U = 350 \text{ W}$ $V = 400 \text{ mm/s}$	

*Bảng 4.5. Kết quả đo  $S_w$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  và  $R_a$* 

Mẫu đo	Vùng đo	$S_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_q$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
Mẫu 1	Vùng đo 1	4.078	5.301	53.347	3.920
	Vùng đo 2	5.954	7.336	54.460	6.015
	Vùng đo 3	4.487	6.096	68.715	5.328
	Giá trị trung bình	<b>4.840</b>	<b>6.244</b>	<b>58.841</b>	<b>5.088</b>
Mẫu 2	Vùng đo 1	4.820	6.198	40.437	3.507
	Vùng đo 2	4.625	5.975	56.290	3.318
	Vùng đo 3	4.705	5.965	43.255	3.132
	Giá trị trung bình	<b>4.717</b>	<b>6.046</b>	<b>46.660</b>	<b>3.319</b>
Mẫu 3	Vùng đo 1	13.263	16.372	114.537	12.634
	Vùng đo 2	11.552	14.099	105.819	13.809
	Vùng đo 3	12.518	15.536	97.725	15.265
	Giá trị trung bình	<b>12.886</b>	<b>15.336</b>	<b>106.027</b>	<b>13.902</b>
Mẫu 4	Vùng đo 1	16.210	19.731	107.145	18.172
	Vùng đo 2	16.350	20.325	111.853	13.486
	Vùng đo 3	14.204	17.806	107.479	15.596
	Giá trị trung bình	<b>15.588</b>	<b>19.288</b>	<b>108.826</b>	<b>15.751</b>
Mẫu 5	Vùng đo 1	8.796	10.887	69.603	5.005
	Vùng đo 2	7.995	10.177	80.697	8.277
	Vùng đo 3	10.423	13.493	92.919	6.379
	Giá trị trung bình	<b>9.071</b>	<b>11.519</b>	<b>81.073</b>	<b>6.553</b>
Mẫu 6	Vùng đo 1	7.981	9.872	65.186	9.373
	Vùng đo 2	7.736	9.818	79.213	7.008
	Vùng đo 3	6.956	8.693	90.701	5.215
	Giá trị trung bình	<b>7.558</b>	<b>9.461</b>	<b>78.367</b>	<b>7.198</b>
Mẫu 7	Vùng đo 1	18.859	23.364	113.586	26.127
	Vùng đo 2	20.585	24.862	112.778	23.135
	Vùng đo 3	22.387	26.677	106.474	22.812
	Giá trị trung bình	<b>20.610</b>	<b>24.967</b>	<b>110.946</b>	<b>24.025</b>
Mẫu 8	Vùng đo 1	10.594	13.813	100.452	9.833
	Vùng đo 2	11.585	14.816	105.387	10.737
	Vùng đo 3	13.593	16.429	94.019	10.515
	Giá trị trung bình	<b>11.924</b>	<b>15.019</b>	<b>99.953</b>	<b>10.362</b>
Mẫu 9	Vùng đo 1	7.285	10.057	82.620	7.452
	Vùng đo 2	7.745	10.505	87.224	9.346
	Vùng đo 3	5.205	7.718	73.213	5.422
	Giá trị trung bình	<b>6.745</b>	<b>9.427</b>	<b>81.019</b>	<b>7.407</b>


#### 4.2.3.4. Các bước đo cấu trúc tế vi

Đặc điểm cấu trúc tế vi có vai trò quyết định đến tính chất cơ lý, hóa học và nhiệt học của vật liệu. Trong nghiên cứu này, thông qua các kết quả kiểm tra cấu trúc tế vi trên máy FESEM S4800 HITACHI tại Đại học Công nghiệp Hà Nội, các khuyết tật và lỗ hổng trong các mẫu in ở cấp độ micromet đã được đánh giá. Phần mềm ImageJ được sử dụng để xử lý hình ảnh, từ đó đánh giá được độ xốp, đặc của mẫu in. Các kết quả kiểm tra cấu trúc tế vi cho các mẫu được thể hiện ở Bảng 4.6 và Phụ lục 2d.



**Hình 4.6** Các bước đánh giá cấu trúc tế vi

**Bảng 4.6. Kết quả kiểm tra đặc điểm cấu trúc tế vi của mẫu in**

Chế độ in	Mẫu in
t = 0.03 mm U = 150 W V = 400 mm/s	 <p style="text-align: center;">Độ xốp: 7.81 %</p>

### 4.3. Kết quả và bàn luận

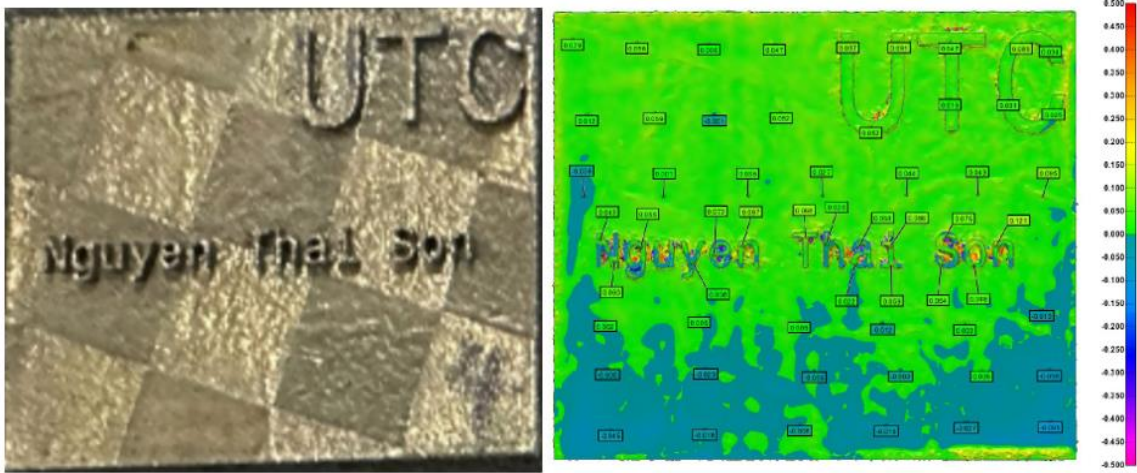
#### 4.3.1. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới sai lệch hình dạng

Với mục đích thiết lập mô hình hồi quy thể hiện mối liên hệ giữa thông số công nghệ in với thông số đầu ra là độ sai lệch hình dạng mẫu in, tiến hành quét và xử lý dữ liệu 3D các mẫu in. Kết quả độ sai lệch hình dạng (D) lớn nhất của mỗi mẫu in được thể hiện ở Bảng 4.7.

**Bảng 4.7. Kết quả đo độ sai lệch hình dạng lớn nhất của các mẫu in**

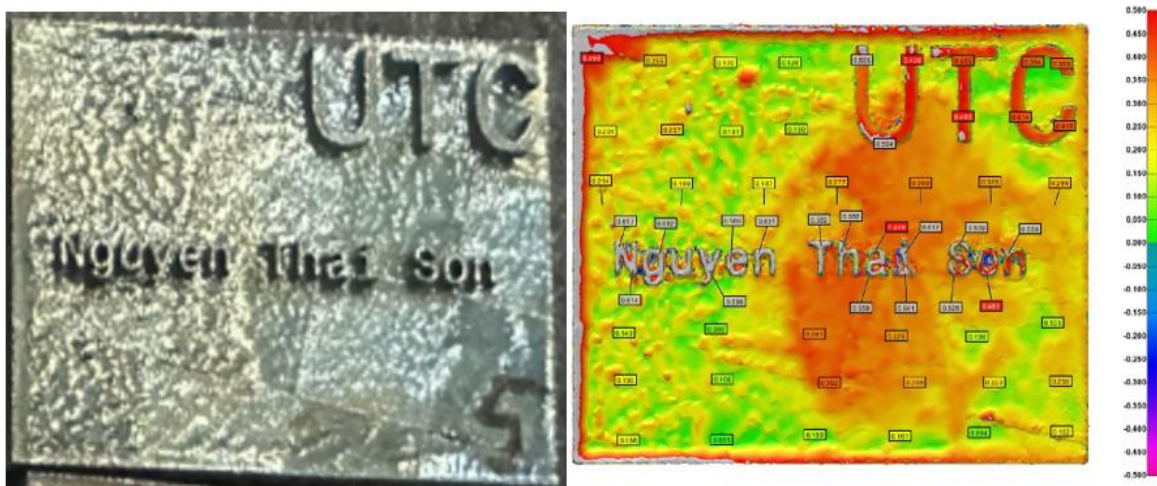
Mẫu in	Công suất nguồn laser U (W)	Vận tốc in V (mm/s)	Chiều dày lớp in t (mm)	Độ sai lệch hình dạng D (mm)
1	150	400	0.030	<b>0.319</b>
2	350	400	0.030	<b>0.611</b>
3	150	1500	0.030	<b>0.142</b>
4	350	1500	0.030	<b>0.121</b>
5	150	400	0.060	<b>0.682</b>
6	350	400	0.060	<b>0.664</b>
7	150	1500	0.060	<b>0.447</b>
8	350	1500	0.060	<b>0.370</b>
9	250	950	0.045	<b>0.417</b>

Trong số các mẫu in trên, mẫu số 4 có độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất tương ứng với công suất nguồn laser  $U = 350 \text{ W}$ , vận tốc in  $V = 1500 \text{ mm/s}$  và chiều dày lớp  $t = 0.03 \text{ mm}$  như trong Hình 4.7.



**Hình 4.7. Mẫu số 4 có độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất**

Mẫu số 5 có độ sai lệch hình dạng lớn nhất tương ứng với công suất nguồn laser  $U = 150 \text{ W}$ , vận tốc in  $V = 400 \text{ mm/s}$  và chiều dày lớp  $t = 0.06 \text{ mm}$  như trong Hình 4.8.



**Hình 4.8. Mẫu số 5 có độ sai lệch hình dạng lớn nhất**

Từ dữ liệu thí nghiệm, mô hình hồi quy được xác định bằng phần mềm MiniTab. Mô hình hồi quy cho thấy mối quan hệ giữa độ lệch hình dạng ( $D$ ) và các thông số của quá trình in bao gồm công suất nguồn laser ( $U$ ), vận tốc in ( $V$ ) và chiều dày lớp ( $t$ ) được lập theo phương trình tổng quát (4.1):

$$D = -B_0 + B_1 U + B_2 V + B_3 t - B_4 UV - B_5 Vt - B_6 UVt$$

Sử dụng phần mềm Minitab -19 xác định được các hệ số hồi quy  $B_0; B_1, \dots, B_6$

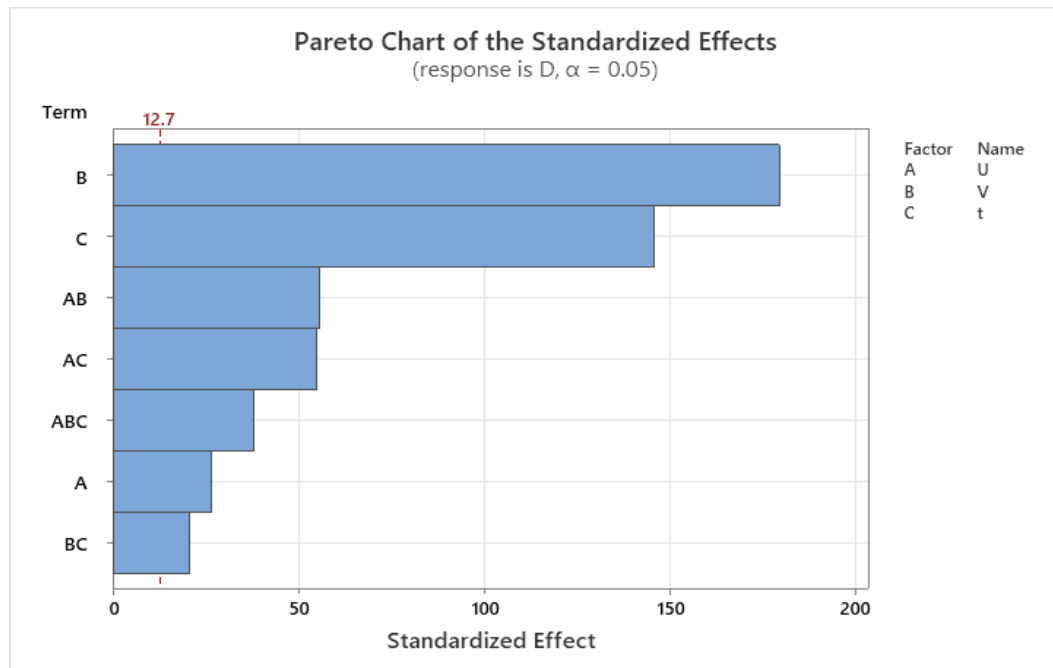
Kết quả thu được phương trình hồi quy thực nghiệm (4.2):

$$D = -0.6071 + 0.004041 U + 0.000278 V + 22.862 t - 0.000003 U * V - 0.06706 U * t - 0.007530 V * t + 0.000038 U * V * t \quad (\text{mm}) \quad (4.2)$$

**Bảng 4.8. Phân tích các biến**

Ký hiệu	Hệ số	Giá trị P
$U$	0.004041	0.024
$V$	0.000278	0.004
$t$	22.86200	0.004
$U*V$	-0.000003	0.011
$U*t$	-0.067060	0.012
$V*t$	-0.007530	0.031
$U*V*t$	0.000038	0.017

Các biến  $U$ ,  $V$ ,  $t$  và tương tác giữa các biến  $U*V$ ,  $U*t$ ,  $V*t$  và  $U*V*t$  đều có ý nghĩa trong mô hình hồi quy với giá trị P nhỏ hơn 0.05 được thể hiện trong Bảng 4.8. Cũng từ biểu đồ Pareto thể hiện trong Hình 4.8, có thể thấy rằng các biến và tương tác của các biến đều ảnh hưởng đến hàm mục tiêu đầu ra ( $D$ ), trong đó tốc độ in có ảnh hưởng lớn nhất đến độ lệch hình dạng của bộ phận in.

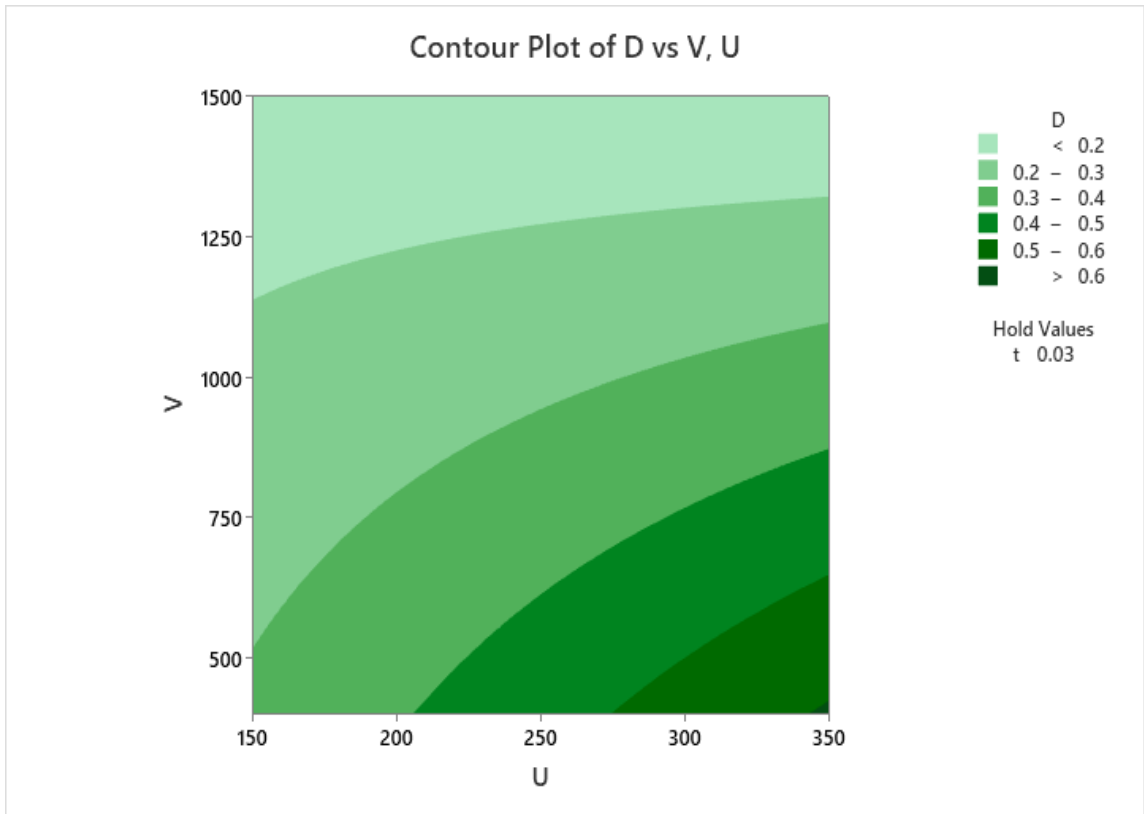


**Hình 4.9. Biểu đồ Pareto của các biến**

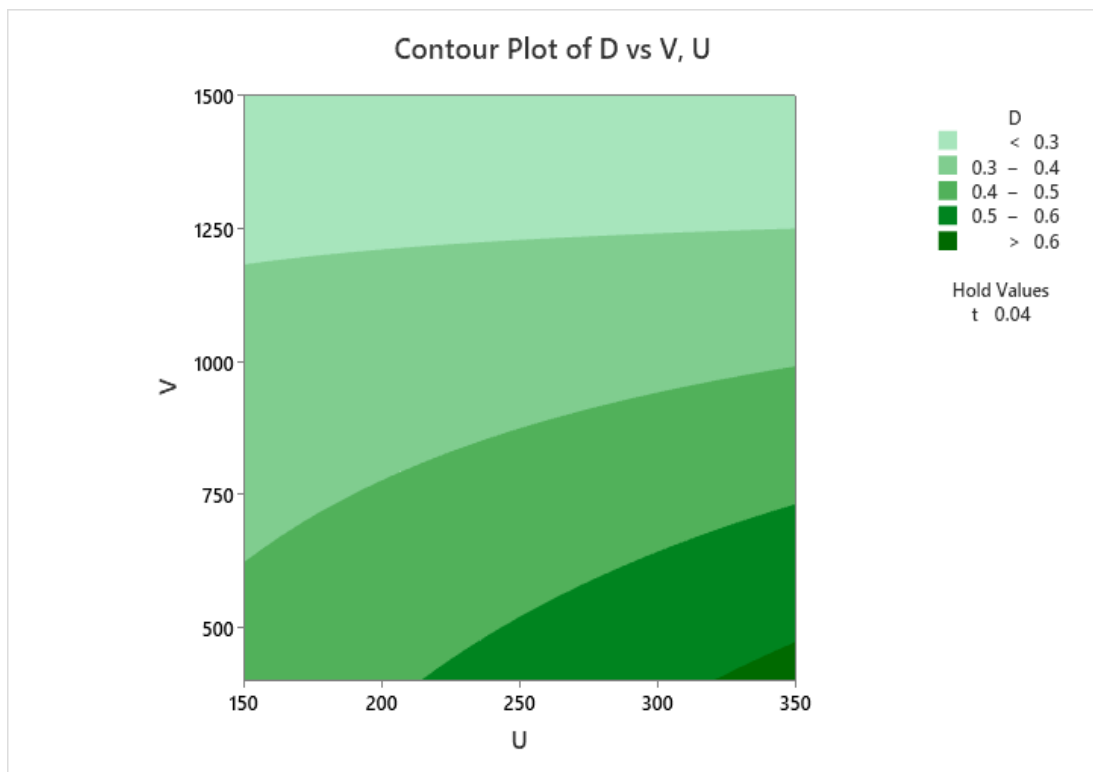
Công thức 4.1 cho phép xác định độ lệch hình dạng liên quan đến ba thông số in bao gồm công suất nguồn laser, tốc độ in và độ dày lớp. Trong nghiên cứu của Feng và cộng sự, độ sai lệch hình dạng khi in lỗ bằng máy in EP-M100T với vật liệu bột thép 316L có xét tới hai thông số in bao gồm công suất nguồn laser và tốc độ in [84]. Trong khi chiều dày lớp in cũng là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ chính xác hình dạng. Chiều dày lớp in càng lớn thì độ sai lệch hình dạng càng tăng như được phân tích trong Hình 4.10 đến 4.13. Từ mô hình hồi quy được thiết lập, để xác định các thông số quy trình in tối ưu, mối quan hệ giữa  $D$  và các biến  $U$ ,  $V$ ,  $t$  đã được phân tích như thể hiện trong Hình 4.10, 4.11, 4.12 và 4.13 tương ứng với các giá trị  $t = 0.03, 0.04, 0.05$  và  $0.06$  mm.

Từ kết quả phân tích, một số kết luận về giá trị các thông số công nghệ in ảnh hưởng tới độ sai lệch hình dạng như sau:

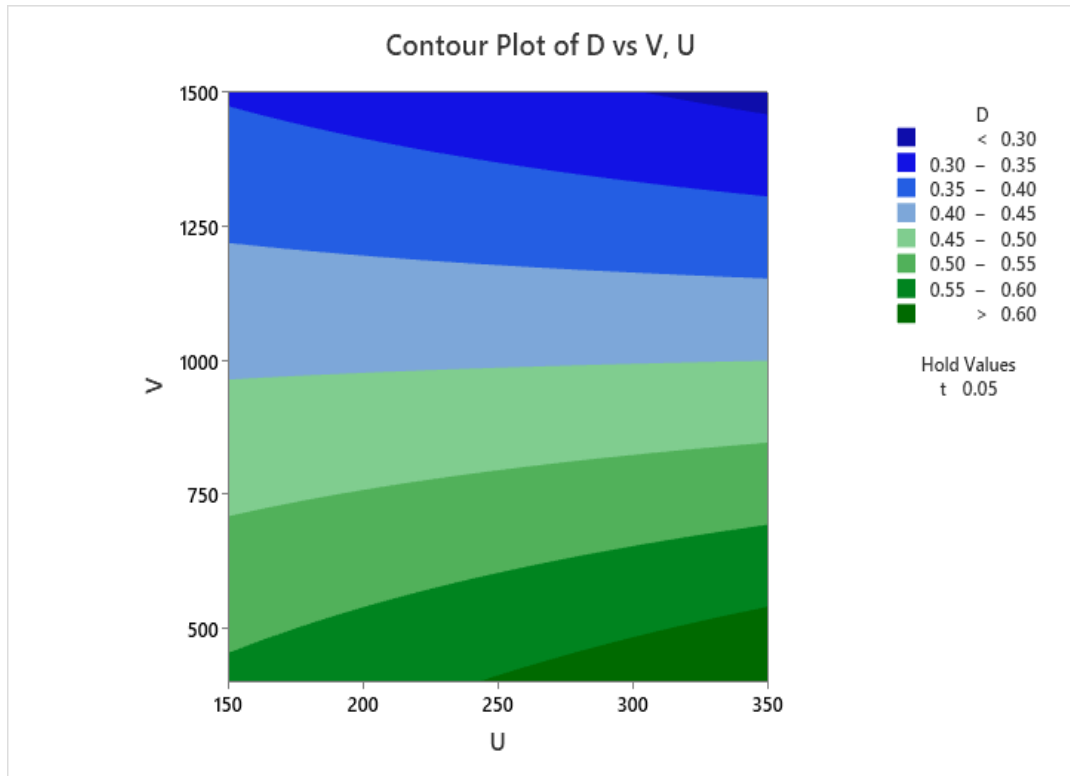
- Giá trị độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất đạt được khi vận tốc in lớn; trong khi giá trị chiều dày lớp in nhỏ. So với kết quả nghiên cứu của Pal và cộng sự với vật liệu Ti6Al4V, độ sai lệch hình dạng giảm khi vận tốc in tăng [85].
- Độ sai lệch hình dạng giảm khi vận tốc in tăng và giá trị công suất nguồn laser trung bình trong phạm vi khảo sát là từ 150 W đến 350 W. Kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Feng và cộng sự với vật liệu bột thép không gỉ 316L khi in trên máy in SLM [84].
- Với chiều dày lớp in  $t = 0.03$  mm, chi tiết in sẽ có độ sai lệch hình dạng nhỏ hơn 0.2 mm khi giá trị vận tốc in nằm trong khoảng 1250 đến 1500 mm/s và giá trị công suất nguồn laser nằm trong khoảng 150 đến 350 W như thể hiện trong Hình 4.10.
- Với  $t = 0.05$  mm (Hình 4.12) và  $t = 0.06$  mm (Hình 4.13), để đạt được độ sai lệch hình dạng nhỏ hơn 0.3 mm, cần có giá trị  $U$  và  $V$  lớn.
- Trong nghiên cứu này, độ sai lệch hình dạng lớn nhất là 0.682 mm tương ứng với các thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser 150 W, vận tốc in 400 mm/s và chiều dày lớp in 0.06 mm.
- Các thông số quy trình in tối ưu đạt được với  $t = 0.03$  mm,  $U = 350$  W và  $V = 1500$  mm/s tương ứng với  $D = 0.1207$  mm.



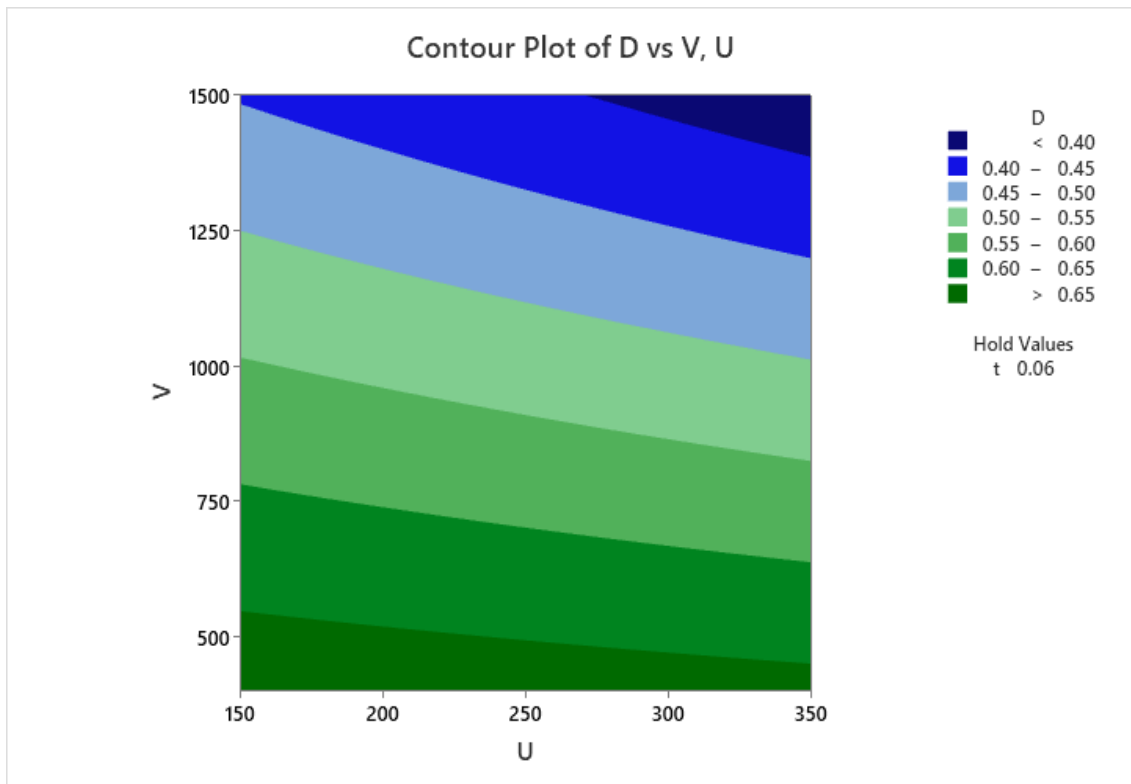
**Hình 4.10. Đồ thị mối quan hệ giữa D với U, V khi  $t = 0.03$  mm**



**Hình 4.11. Đồ thị mối quan hệ giữa D với U, V khi  $t = 0.04$  mm**



**Hình 4.12.** Đồ thị mối quan hệ giữa  $D$  với  $U$ ,  $V$  khi  $t = 0.05$  mm



**Hình 4.13.** Đồ thị mối quan hệ giữa  $D$  với  $U$ ,  $V$  khi  $t = 0.06$  mm

Áp dụng với dữ liệu thí nghiệm ở trên, ta có:

**Bảng 4.9: Giá trị của các thông số mô hình của D**

U	V	t	D	ln(U)	ln(V)	ln(t)	ln(D)
150	400	0.03	0.319	5.011	5.991	-3.507	-1.143
350	400	0.03	0.611	5.858	5.991	-3.507	-0.493
150	1500	0.03	0.142	5.011	7.313	-3.507	-1.952
350	1500	0.03	0.121	5.858	7.313	-3.507	-2.112
150	400	0.06	0.682	5.011	5.991	-2.813	-0.383
350	400	0.06	0.664	5.858	5.991	-2.813	-0.409
150	1500	0.06	0.447	5.011	7.313	-2.813	-0.805
350	1500	0.06	0.473	5.858	7.313	-2.813	-0.749
250	950	0.045	0.417	5.521	6.856	-3.101	-0.875

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \ln U_1 & \ln V_1 & \ln t_1 \\ 1 & \ln U_2 & \ln V_2 & \ln t_2 \\ 1 & \ln U_3 & \ln V_3 & \ln t_3 \\ 1 & \ln U_4 & \ln V_4 & \ln t_4 \\ 1 & \ln U_5 & \ln V_5 & \ln t_5 \\ 1 & \ln U_6 & \ln V_6 & \ln t_6 \\ 1 & \ln U_7 & \ln V_7 & \ln t_7 \\ 1 & \ln U_8 & \ln V_8 & \ln t_8 \\ 1 & \ln U_9 & \ln V_9 & \ln t_9 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} \ln D_1 \\ \ln D_2 \\ \ln D_3 \\ \ln D_4 \\ \ln D_5 \\ \ln D_6 \\ \ln D_7 \\ \ln D_8 \\ \ln D_9 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 5.011 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.521 & 6.856 & -3.101 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} -1.143 \\ -0.493 \\ -1.952 \\ -2.112 \\ -0.383 \\ -0.409 \\ -0.805 \\ -0.749 \\ -0.875 \end{bmatrix}$$

$$X^T X = \begin{bmatrix} 9.000 & 48.997 & 60.072 & -28.381 \\ 48.997 & 268.187 & 327.054 & -154.505 \\ 60.075 & 327.054 & 404.493 & -189.423 \\ -28.381 & -154.505 & -189.423 & 90.464 \end{bmatrix}$$

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 43.597 & -3.767 & -1.883 & 3.302 \\ -3.767 & 0.694 & -0.003 & -0.003 \\ -1.883 & -0.003 & 0.283 & -0.003 \\ 3.302 & -0.003 & -0.003 & 1.035 \end{bmatrix}$$

$$X^T y = \begin{bmatrix} -8.921 \\ -48.337 \\ -61.630 \\ 29.303 \end{bmatrix}$$

Ta có:

$$\beta = [5.932, 0.162, -0.595, 1.217]$$

$$a = 376.908; b = 0.162; c = -0.595; d = 1.217$$

Độ sai lệch hình dạng:

$$D = 376.908 U^{0.162} V^{-0.595} t^{1.217}$$

**Bảng 4.10: Giá trị thực nghiệm và giá trị chuẩn đoán của D**

U	V	t	D'	D	lnD'	lnD	RES	SS re	K
150	400	0.03	0.338	0.319	-1.089	-1.143	0.054	0.003	0.098
350	400	0.03	0.388	0.611	-0.951	-0.493	-0.459	0.210	0.194
150	1500	0.03	0.154	0.142	-1.875	-1.952	0.077	0.006	0.275
350	1500	0.03	0.177	0.121	-1.738	-2.112	0.374	0.140	0.296
150	400	0.06	0.787	0.682	-0.245	-0.383	0.138	0.019	0.265
350	400	0.06	0.902	0.664	-0.108	-0.409	0.302	0.091	0.247
150	1500	0.06	0.358	0.447	-1.032	-0.805	-0.226	0.051	0.03
350	1500	0.06	0.411	0.37	-0.894	-0.994	0.100	0.010	0.047
250	950	0.045	0.360	0.417	-1.027	-0.875	-0.152	0.023	0

Với D' là giá trị độ lệch hình dạng tính theo mô hình hồi quy; D là giá trị độ lệch hình dạng đo được từ thực nghiệm. RES là độ lệch giữa giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán. SSre là bình phương của độ lệch. K là giá trị tuyệt đối độ lệch của D so với D trung bình. Giá trị D trung bình từ kết quả đo thực nghiệm là 0.417. Ta có tổng của RES là 0.206; tổng của SSre là J = 0.554; tổng độ lệch so với D trung bình là S = 1.452.

Hệ số  $r^2 = 1 - (J/S) = 0.618$ . Giá trị  $r^2$  gần tới 1 thể hiện tính chính xác của mô hình. Mô hình thể hiện mối liên hệ giữa D với chế độ công nghệ là phù hợp.

#### 4.3.2. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in đến độ nhám bề mặt

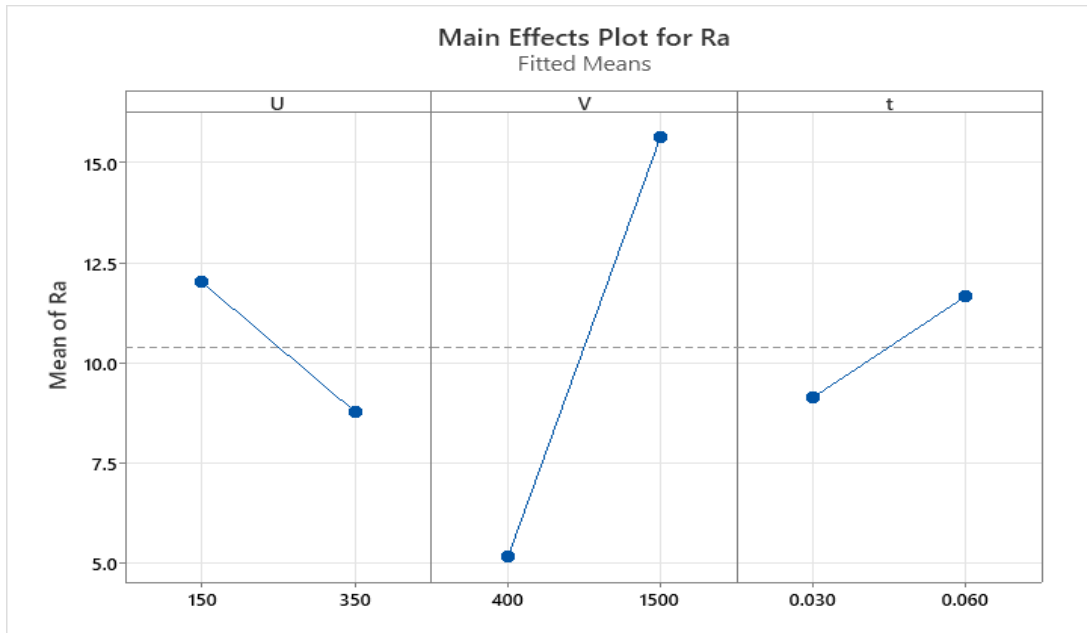
Từ kết quả thực nghiệm, kết quả đo độ nhám bề mặt  $R_a$  (1D) và  $S_a$  (2D) được thể hiện ở Bảng 4.11.

**Bảng 4.11. Kết quả đo độ nhám  $R_a$  và  $S_a$  của các mẫu in**

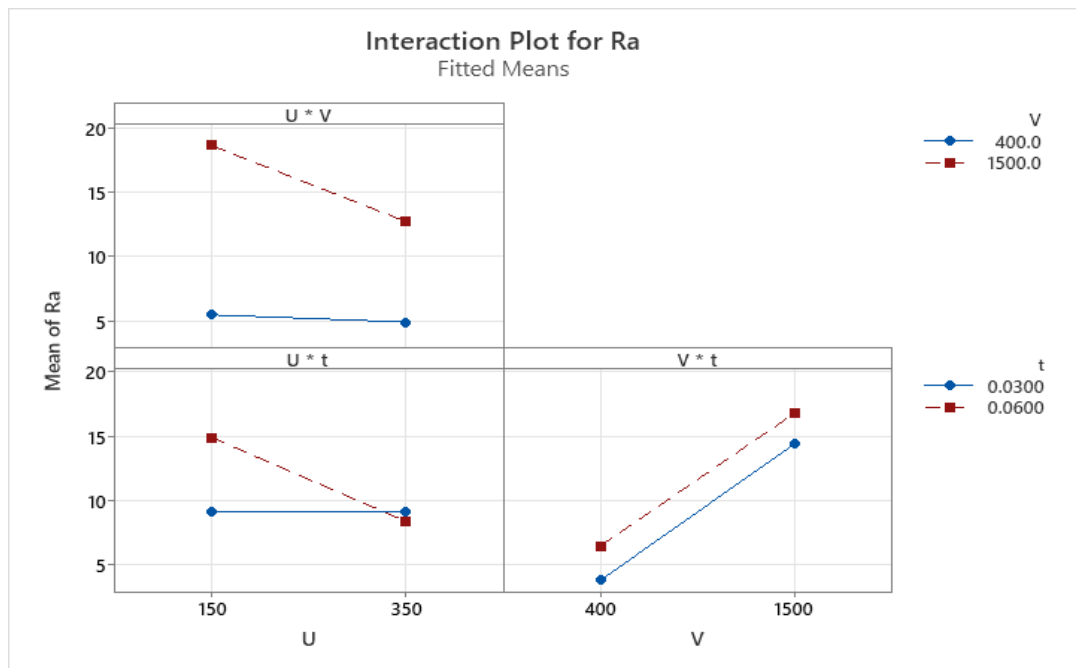
Mẫu in	Công suất nguồn laser U (W)	Vận tốc in V (mm/s)	Chiều dày lớp in t (mm)	Độ nhám $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Độ nhám $S_a$ ( $\mu\text{m}$ )
1	150	400	0.03	<b>5.088</b>	<b>4.840</b>
2	350	400	0.03	<b>3.319</b>	<b>4.717</b>
3	150	1500	0.03	<b>13.902</b>	<b>12.886</b>
4	350	1500	0.03	<b>15.751</b>	<b>15.588</b>
5	150	400	0.06	<b>6.553</b>	<b>9.071</b>
6	350	400	0.06	<b>7.198</b>	<b>7.558</b>
7	150	1500	0.06	<b>24.025</b>	<b>20.610</b>
8	350	1500	0.06	<b>10.362</b>	<b>11.924</b>
9	250	950	0.045	<b>7.407</b>	<b>6.745</b>

Ứng dụng Minitab với các dữ liệu trên, mô hình hồi quy xác định mối liên hệ giữa các thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser ( $U$ ), vận tốc in ( $V$ ), chiều dày lớp in ( $t$ ) với độ nhám bề mặt  $R_a$  như sau:

$$R_a = 12.2 - 0.0601 U - 0.0145 V - 279 t + 0.000098 U*V + 1.49 U*t + 0.670 V*t - 0.00272 U*V*t (\mu\text{m}) \quad (4.2)$$



**Hình 4.14. Đồ thị ảnh hưởng đơn yếu tố tới  $R_a$**

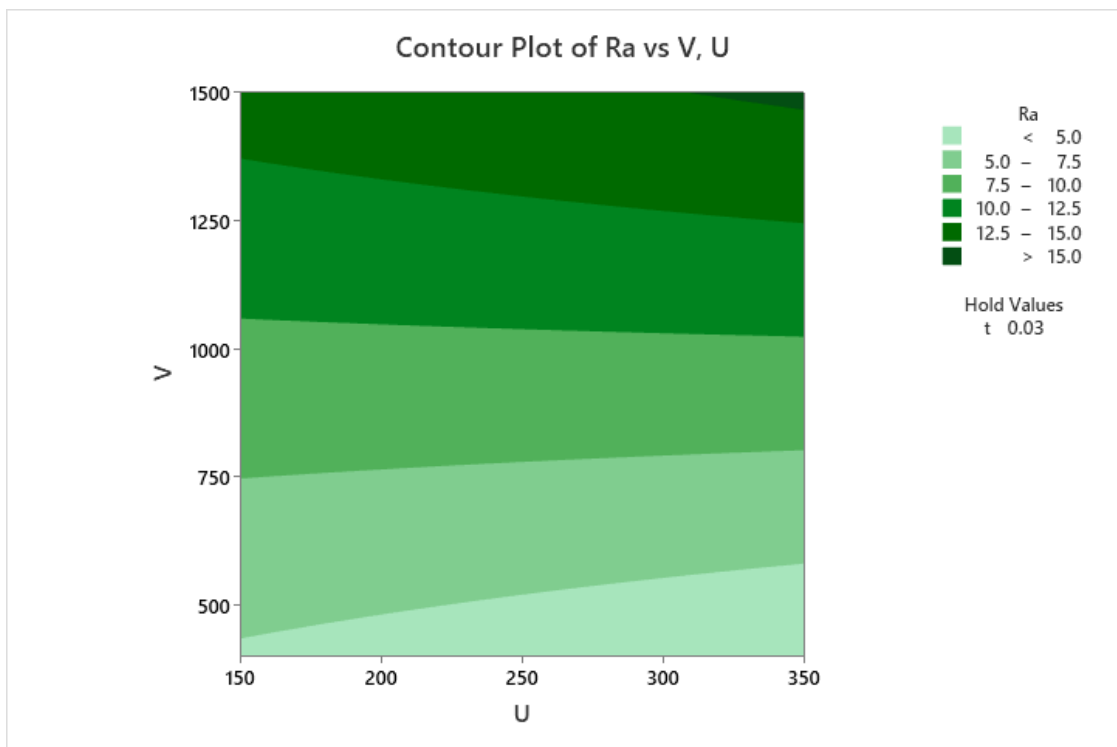


**Hình 4.15. Đồ thị ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố tới  $R_a$**

Hình 4.14 thể hiện ảnh hưởng của các yếu tố công suất nguồn laser ( $U$ ), vận tốc in ( $V$ ), chiều dày lớp in ( $t$ ) với độ nhám bề mặt  $R_a$ . Khi  $V$ ,  $t$  tăng đều cho giá trị độ nhám bề mặt lớn, trong khi tăng công suất nguồn laser sẽ cho giá trị độ nhám bề mặt nhỏ. Khi tăng giá trị công suất nguồn laser khả năng nóng chảy kim loại sẽ

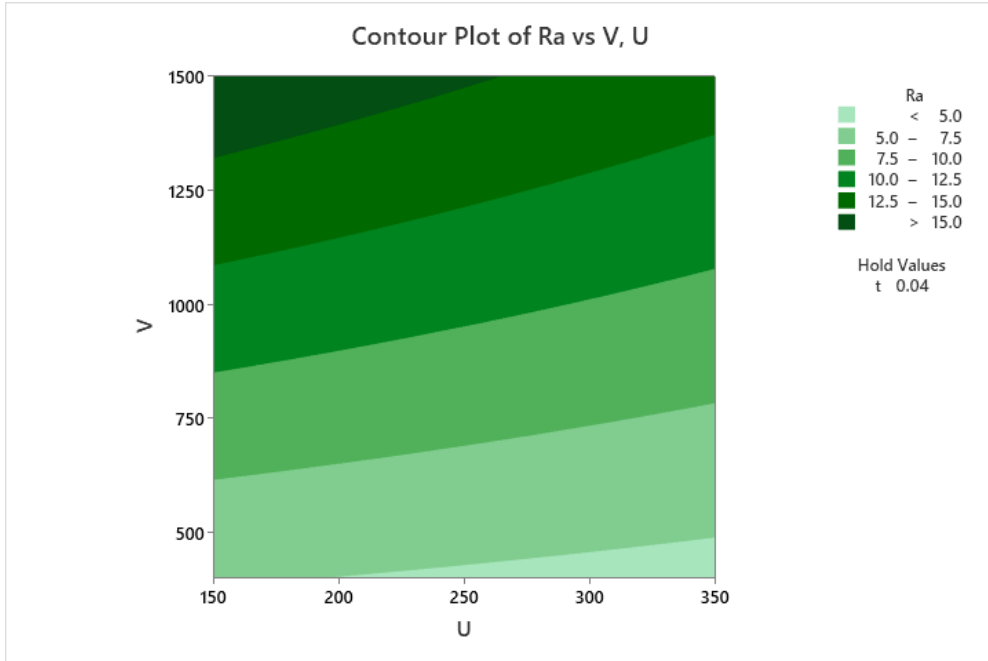
tốt hơn nên chất lượng bề mặt thu được của chi tiết sau in sẽ tốt hơn. Hình 4.15 thể hiện ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố  $U$ ,  $V$ ,  $t$  với giá trị độ nhám bề mặt  $R_a$ . Khi  $V$  và  $t$  đều tăng, giá trị độ nhám càng lớn, bề mặt chi tiết in thu được có chất lượng thấp.

Khi  $t = 0.03$  mm như thể hiện trên Hình 4.16, giá trị độ nhám bề mặt  $R_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $5 \mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 150 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 500 mm/s. Giá trị  $R_a$  đạt được lớn hơn  $15 \mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser 350 W, vận tốc in 1500 mm/s.

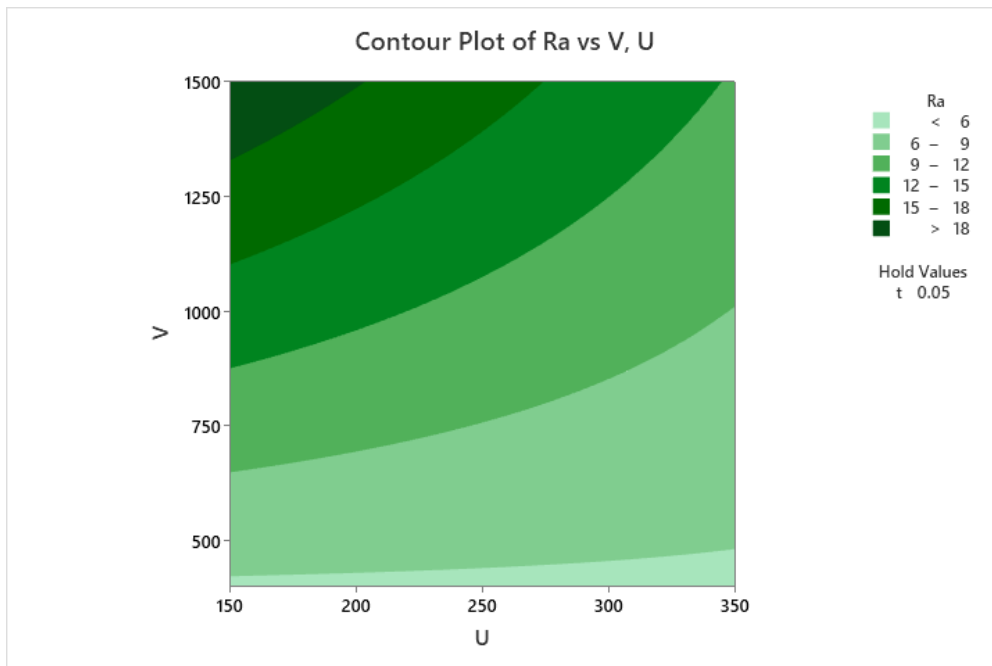


**Hình 4.16. Đồ thị ảnh hưởng của  $U$ ,  $V$  tới  $R_a$  khi  $t = 0.03$  mm**

Khi  $t = 0.04$  mm như thể hiện trên Hình 4.17, giá trị độ nhám bề mặt  $R_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $5 \mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 250 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 500 mm/s. Giá trị  $R_a$  đạt được lớn hơn  $15 \mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser trong phạm vi từ 150 đến 250 W, vận tốc in trong phạm vi từ 1300 đến 1500 mm/s.

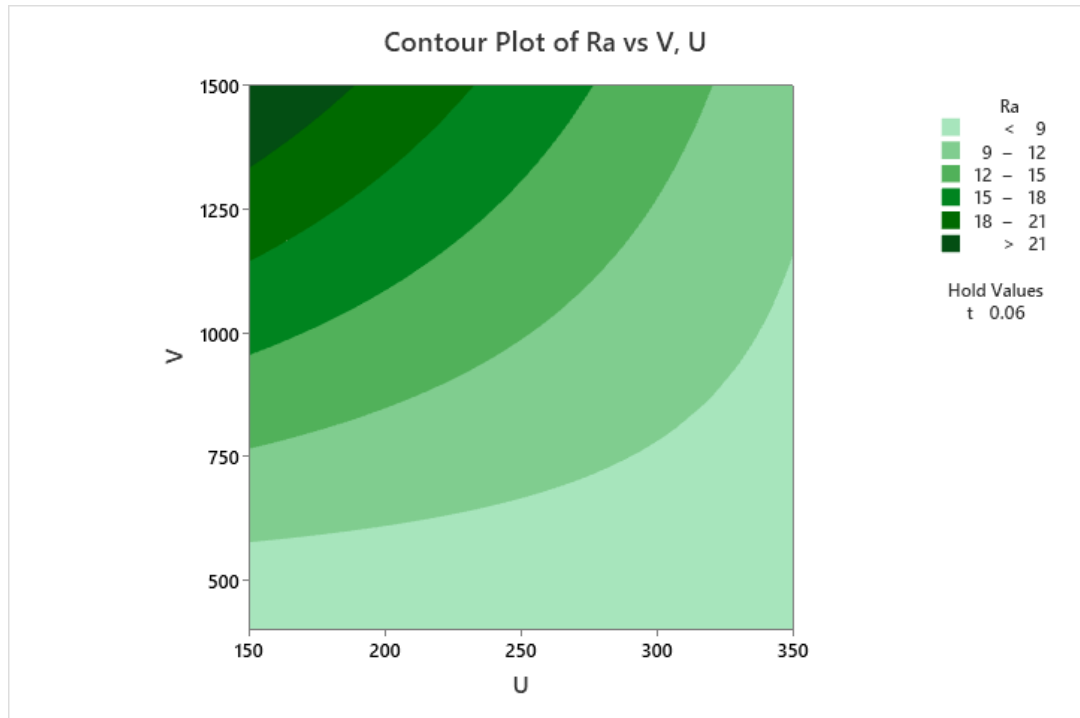


**Hình 4.17. Đồ thị ảnh hưởng của  $U$ ,  $V$  tới  $R_a$  khi  $t = 0.04$  mm**



**Hình 4.18. Đồ thị ảnh hưởng của  $U$ ,  $V$  tới  $R_a$  khi  $t = 0.05$  mm**

Khi  $t = 0.05$  mm như thể hiện trên Hình 4.18, giá trị độ nhám bề mặt  $R_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $6\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 150 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 600 mm/s. Giá trị  $R_a$  đạt được lớn hơn  $18\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser trong phạm vi từ 150 đến 250 W, vận tốc in trong phạm vi từ 1300 đến 1500 mm/s.



**Hình 4.19. Đồ thị ảnh hưởng của U, V tới  $R_a$  khi  $t = 0.06$  mm**

Khi  $t=0.06$  mm như thể hiện trên Hình 4.19, giá trị độ nhám bề mặt  $R_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $9\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 150 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 550 mm/s. Vận tốc có thể đạt tới 1000 mm/s khi  $U=350$  W. Giá trị  $R_a$  đạt được lớn hơn  $21\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser trong phạm vi từ 150 đến 180 W, vận tốc in trong phạm vi từ 1300 đến 1500 mm/s.

Mô hình hồi quy cũng được biểu diễn dạng hàm mũ như sau:

$$R_a = mU^nV^pt^q \quad (4.3)$$

Trong đó  $m, n, p, q$  là các thông số mô hình từ thực nghiệm.

Logarit hai vế của phương trình 4.3 ta có:

$$\ln(R_a) = \ln(m) + n \ln(U) + p \ln(V) + q \ln(t) \quad (4.4)$$

**Bảng 4.12: Giá trị của các thông số mô hình của  $R_a$** 

U	V	t	$R_a$	$\ln(U)$	$\ln(V)$	$\ln(t)$	$\ln(R_a)$
150	400	0.03	5.088	5.011	5.991	-3.507	1.627
350	400	0.03	3.319	5.858	5.991	-3.507	1.200
150	1500	0.03	13.902	5.011	7.313	-3.507	2.632
350	1500	0.03	15.751	5.858	7.313	-3.507	2.757
150	400	0.06	6.553	5.011	5.991	-2.813	1.879
350	400	0.06	7.198	5.858	5.991	-2.813	1.973
150	1500	0.06	24.025	5.011	7.313	-2.813	3.179
350	1500	0.06	10.362	5.858	7.313	-2.813	2.338
250	950	0.045	7.407	5.521	6.856	-3.101	2.002

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \ln U_1 & \ln V_1 & \ln t_1 \\ 1 & \ln U_2 & \ln V_2 & \ln t_2 \\ 1 & \ln U_3 & \ln V_3 & \ln t_3 \\ 1 & \ln U_4 & \ln V_4 & \ln t_4 \\ 1 & \ln U_5 & \ln V_5 & \ln t_5 \\ 1 & \ln U_6 & \ln V_6 & \ln t_6 \\ 1 & \ln U_7 & \ln V_7 & \ln t_7 \\ 1 & \ln U_8 & \ln V_8 & \ln t_8 \\ 1 & \ln U_9 & \ln V_9 & \ln t_9 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} \ln R_{a1} \\ \ln R_{a2} \\ \ln R_{a3} \\ \ln R_{a4} \\ \ln R_{a5} \\ \ln R_{a6} \\ \ln R_{a7} \\ \ln R_{a8} \\ \ln R_{a9} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 5.011 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.521 & 6.856 & -3.101 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} 5.088 \\ 3.319 \\ 13.902 \\ 15.751 \\ 6.553 \\ 7.198 \\ 24.025 \\ 10.362 \\ 7.407 \end{bmatrix}$$

$$\beta = [0.005, -0.329, 0.781, 0.397]$$

$$m = 1.0005; n = -0.329; p = 0.781; q = 0.397.$$

Độ sai nhám bề mặt  $R_a$ :

$$R_a = 1.0005 U^{-0.329} V^{0.781} t^{0.397}$$

**Bảng 4.13: Giá trị thực nghiệm và giá trị chuẩn đoán của  $R_a$** 

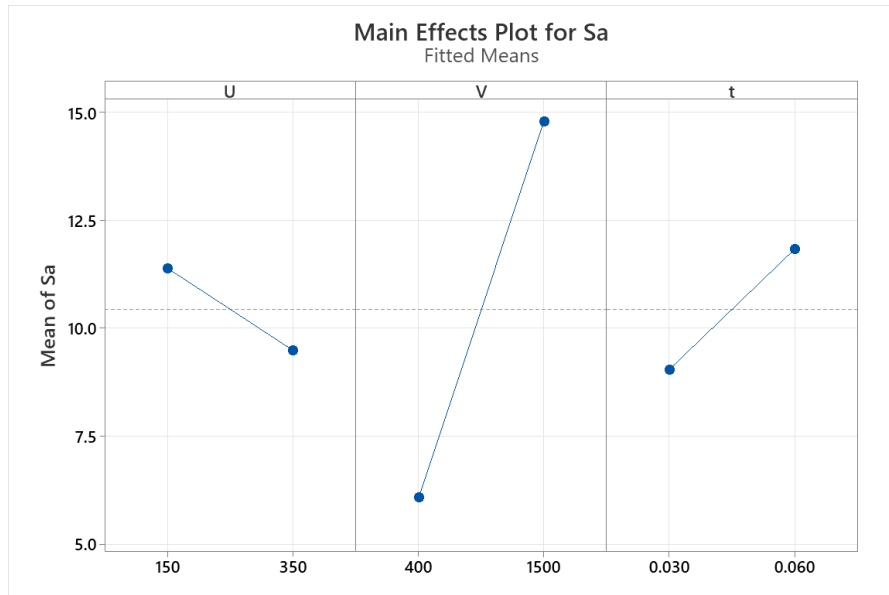
U	V	t	$R_a'$	$R_a$	$\ln R_a'$	$\ln R_a$	RES	SSre	K
150	400	0.03	5.174	5.088	1.644	1.627	0.017	0.000	2.319
350	400	0.03	3.916	3.319	1.365	1.200	0.165	0.027	4.088
150	1500	0.03	14.527	13.902	2.676	2.632	0.044	0.002	6.495
350	1500	0.03	10.993	15.751	2.397	2.757	-0.360	0.129	8.344
150	400	0.06	6.813	6.553	1.919	1.880	0.039	0.002	0.854
350	400	0.06	5.156	7.198	1.640	1.974	-0.334	0.111	0.209
150	1500	0.06	19.129	24.025	2.951	3.179	-0.228	0.052	16.618
350	1500	0.06	14.475	10.362	2.672	2.338	0.334	0.112	2.955
250	950	0.045	10.097	7.407	2.312	2.002	0.310	0.096	0

Với  $R_a'$  là giá trị độ nhám tính theo mô hình hồi quy;  $R_a$  là giá trị độ nhám đo được từ thực nghiệm. RES là độ lệch giữa giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán. SSre là bình phương của độ lệch. K là độ lệch của  $R_a$  so với  $R_a$  trung bình. Giá trị trung bình của  $R_a$  đo được từ thực nghiệm là  $7.047 \mu\text{m}$ . Ta có tổng của RES là  $-0.012$ ; tổng của SSre là  $J = 0.531$ ; tổng độ lệch so với  $R_a$  trung bình là  $S = 41.882$ . Hệ số  $r^2 = 1 - (J/S) = 0.987$ . Giá trị  $r^2$  rất gần tới 1 thể hiện độ chính xác của mô hình cao. Mô hình thể hiện mối liên hệ giữa  $R_a$  với chế độ công nghệ là phù hợp.

Quá trình xử lý dữ liệu và xây dựng mô hình hồi quy cho  $S_a$  tương tự  $R_a$ . Sử dụng dữ liệu đo  $S_a$  ở Bảng 4.11 và ứng dụng Minitab, ta có mô hình hồi quy như sau:

$$S_a = 1.0 - 0.0170 U - 0.0046 V + 43 t + 0.000058 U*V + 0.37 U*t + 0.333 V*t - 0.00151 U*V*t (\mu\text{m}) \quad (4.a)$$

Ảnh hưởng đơn yếu tố và ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố được thể hiện trên Hình 4.20 và 4.21. Từ hình vẽ ta nhận thấy rằng mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến  $S_a$  cũng tương tự như đối với  $R_a$ . Cụ thể: Khi V hoặc t hoặc cả 2 tăng đều cho giá trị độ nhám bề mặt lớn, trong khi tăng công suất nguồn laser sẽ cho giá trị độ nhám bề mặt nhỏ. Tuy nhiên với bộ thông số công nghệ đang xét, giá trị  $S_a$  sẽ nằm trong giải từ  $6-15 \mu\text{m}$  còn  $R_a$  nằm trong giải từ  $5-16.5 \mu\text{m}$ . Điều đó chứng tỏ rằng khi đo giá trị  $S_a$  sẽ đánh giá được toàn diện hơn bề mặt đo.



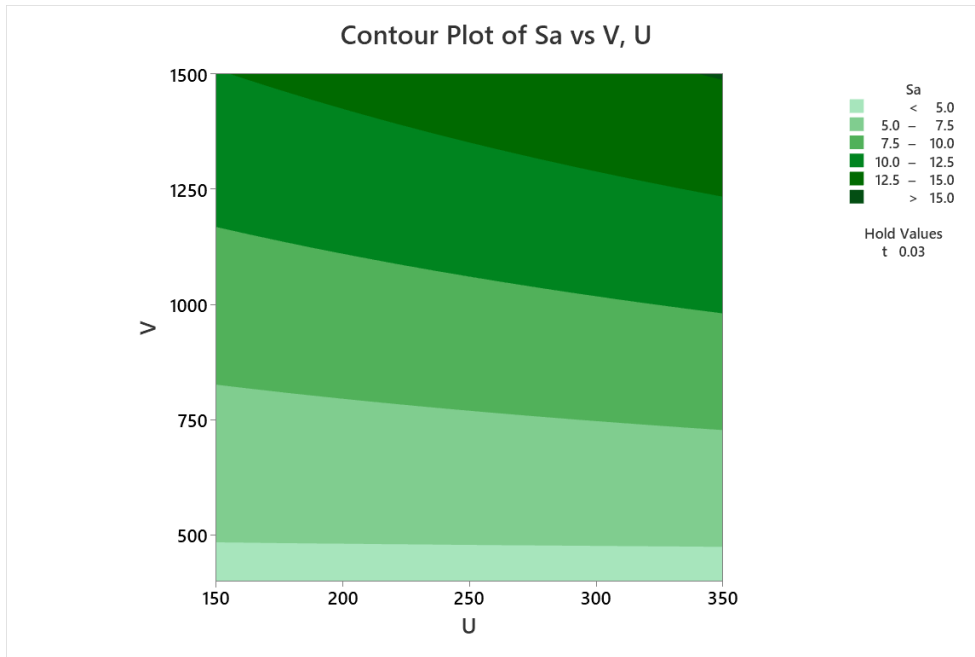
**Hình 4.20. Đồ thị ảnh hưởng đơn yếu tố tới  $S_a$**



**Hình 4.21. Đồ thị ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố tới  $S_a$**

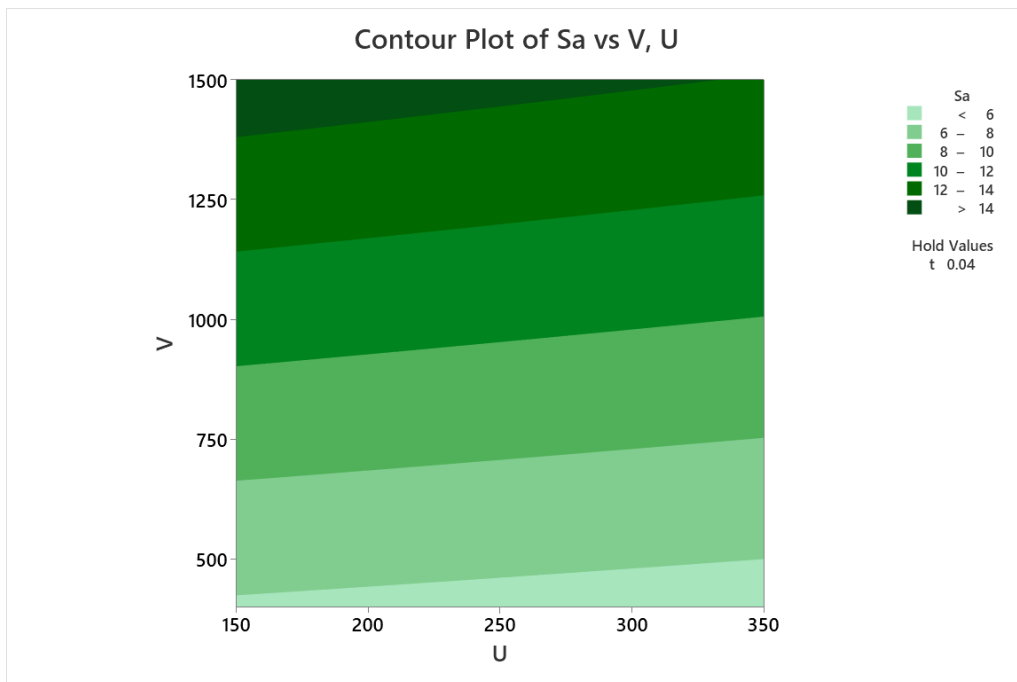
Khi giữ nguyên giá trị t để khảo sát ảnh hưởng của bộ thông số công nghệ tới  $S_a$ , ta cũng có được các phạm vi  $S_a$  tương ứng như khảo sát với  $R_a$ . Cụ thể như Hình 4.22 đến Hình 4.25.

Khi  $t=0.03$  mm như thể hiện trên Hình 4.c, giá trị độ nhám bề mặt  $S_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $5\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 150 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 500 mm/s. Giá trị  $S_a$  đạt được lớn hơn  $15\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser 350 W, vận tốc in 1500 mm/s

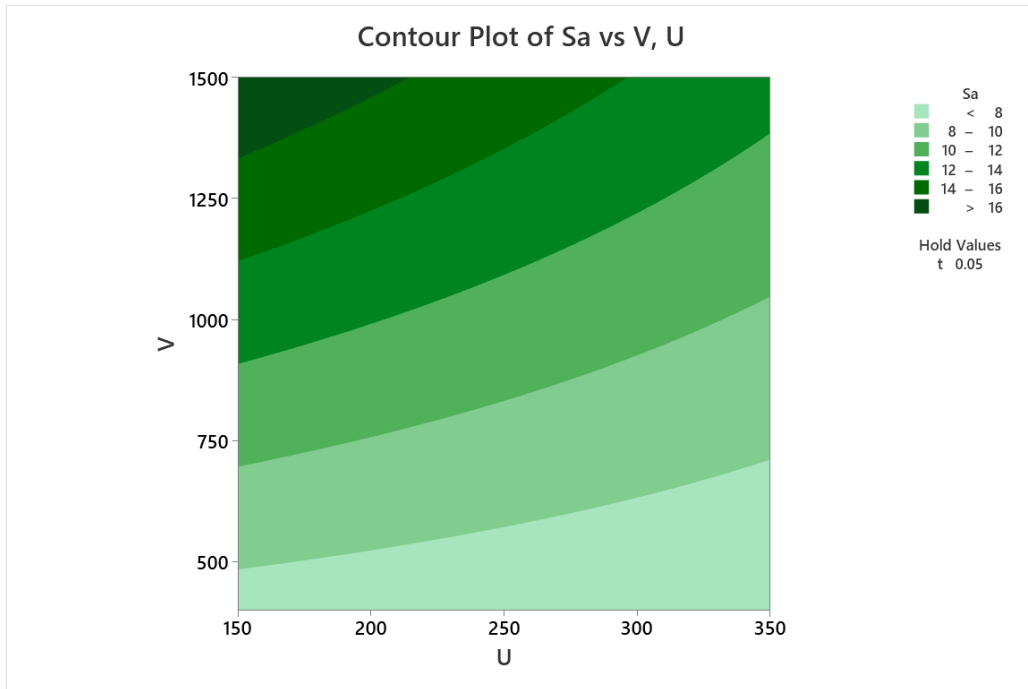


**Hình 4.22. Đồ thị ảnh hưởng của  $U, V$  tới  $S_a$  khi  $t = 0.03$  mm**

Khi  $t = 0.04$  mm như thể hiện trên Hình 4.23, giá trị độ nhám bề mặt  $S_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $6\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 150 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 500 mm/s. Giá trị  $S_a$  đạt được lớn hơn  $14\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser trong phạm vi từ 150 đến 300 W, vận tốc in trong phạm vi từ 1400 đến 1500 mm/s.

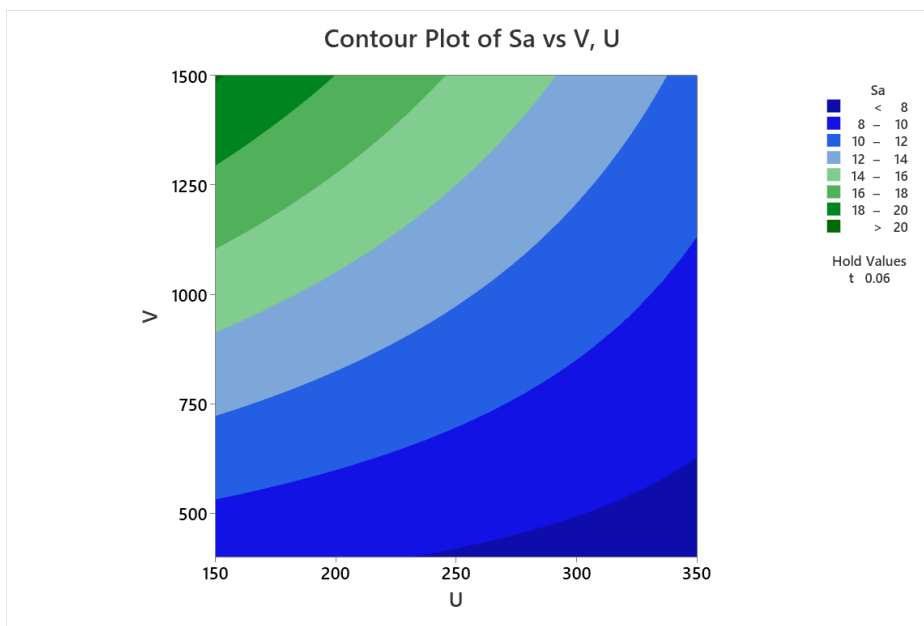


**Hình 4.23. Đồ thị ảnh hưởng của  $U, V$  tới  $S_a$  khi  $t = 0.04$  mm**



**Hình 4.24. Đồ thị ảnh hưởng của  $U, V$  tới  $S_a$  khi  $t = 0.05$  mm**

Khi  $t = 0.05$  mm như thể hiện trên Hình 4.24, giá trị độ nhám bề mặt  $S_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $8\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 150 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 600 mm/s. Giá trị  $S_a$  đạt được lớn hơn  $16\mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser trong phạm vi từ 150 đến 200 W, vận tốc in trong phạm vi từ 1300 đến 1500 mm/s.



**Hình 4.25. Đồ thị ảnh hưởng của  $U, V$  tới  $S_a$  khi  $t = 0.06$  mm**

Khi  $t = 0.06$  mm như thể hiện trên Hình 4.25, giá trị độ nhám bề mặt  $S_a$  đạt được trong phạm vi nhỏ hơn  $8 \mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt tốt) khi công suất nguồn laser trong giới hạn 250 đến 350 W, vận tốc in nhỏ hơn 600 mm/s. Giá trị  $S_a$  đạt được lớn hơn  $20 \mu\text{m}$  (chất lượng bề mặt thấp) ứng với công suất nguồn laser tại 150 W, vận tốc in trong phạm vi từ 1500 mm/s trở lên.

Mô hình hồi quy của  $S_a$  cũng được biểu diễn dạng hàm mũ như sau:

$$S_a = kU^hV^gt^e \quad (4.3)$$

Trong đó  $k, h, g, e$  là các thông số mô hình từ thực nghiệm.

Logarit hai vế của phương trình 4.3 ta có:

$$\ln(S_a) = \ln(k) + h \ln(U) + g \ln(V) + e \ln(t) \quad (4.4)$$

**Bảng 4.14: Giá trị của các thông số mô hình của  $S_a$**

U	V	t	$S_a$	$\ln(U)$	$\ln(V)$	$\ln(t)$	$\ln(S_a)$
150	400	0.03	4.840	5.011	5.991	-3.507	1.577
350	400	0.03	4.717	5.858	5.991	-3.507	1.551
150	1500	0.03	12.886	5.011	7.313	-3.507	2.556
350	1500	0.03	15.588	5.858	7.313	-3.507	2.747
150	400	0.06	9.071	5.011	5.991	-2.813	2.205
350	400	0.06	7.558	5.858	5.991	-2.813	2.023
150	1500	0.06	20.610	5.011	7.313	-2.813	3.026
350	1500	0.06	11.924	5.858	7.313	-2.813	2.479
250	950	0.045	6.745	5.521	6.856	-3.101	1.909

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \ln U_1 & \ln V_1 & \ln t_1 \\ 1 & \ln U_2 & \ln V_2 & \ln t_2 \\ 1 & \ln U_3 & \ln V_3 & \ln t_3 \\ 1 & \ln U_4 & \ln V_4 & \ln t_4 \\ 1 & \ln U_5 & \ln V_5 & \ln t_5 \\ 1 & \ln U_6 & \ln V_6 & \ln t_6 \\ 1 & \ln U_7 & \ln V_7 & \ln t_7 \\ 1 & \ln U_8 & \ln V_8 & \ln t_8 \\ 1 & \ln U_9 & \ln V_9 & \ln t_9 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} \ln S_{a1} \\ \ln S_{a2} \\ \ln S_{a3} \\ \ln S_{a4} \\ \ln S_{a5} \\ \ln S_{a6} \\ \ln S_{a7} \\ \ln S_{a8} \\ \ln S_{a9} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 5.011 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.521 & 6.856 & -3.101 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} 1.577 \\ 1.551 \\ 2.556 \\ 2.747 \\ 2.205 \\ 2.023 \\ 3.026 \\ 2.479 \\ 1.909 \end{bmatrix}$$

$$\beta = [0.493, -0.194, 0.627, 0.442]$$

$$k = 1.6372; h = -0.194; g = 0.627; e = 0.442.$$

Độ nhám bề mặt  $S_a$ :

$$S_a = 1.6372 U^{-0.194} V^{0.627} t^{0.442}$$

**Bảng 4.15: Giá trị thực nghiệm và giá trị chuẩn đoán của  $S_a$**

U	V	t	$S_a'$	$S_a$	$\ln S_a'$	$\ln S_a$	RES	SSre	K
150	400	0.03	5.628	4.840	1.728	1.577	0.151	0.023	4.231
350	400	0.03	4.775	4.717	1.563	1.551	0.012	0.000	4.354
150	1500	0.03	12.890	12.886	2.556	2.556	0.000	0.000	3.815
350	1500	0.03	10.936	15.588	2.392	2.747	-0.354	0.126	6.517
150	400	0.06	7.645	9.071	2.034	2.205	-0.171	0.029	0
350	400	0.06	6.486	7.558	1.870	2.023	-0.153	0.023	1.513
150	1500	0.06	17.510	20.610	2.863	3.026	-0.163	0.027	11.539
350	1500	0.06	14.856	11.924	2.698	2.479	0.220	0.048	2.853
250	950	0.045	10.487	6.745	2.350	1.909	0.441	0.195	2.326

Với  $S_a'$  là giá trị độ nhám tính theo mô hình hồi quy;  $S_a$  là giá trị độ nhám đo được từ thực nghiệm. RES là độ lệch giữa giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán. SSre là bình phương của độ lệch. K là độ lệch của  $S_a$  so với  $S_a$  trung bình. Giá trị trung bình của  $S_a$  đo được từ thực nghiệm là 9.071  $\mu\text{m}$ . Ta có tổng của RES là -0.012; tổng của SSre là  $J = 0.471$ ; tổng độ lệch so với  $S_a$  trung bình là  $S = 37.148$ . Hệ số  $r^2 = 1 - (J/S) = 0.9873$ . Giá trị  $r^2$  rất gần tới 1 thể hiện độ chính xác của mô hình cao. Mô hình thể hiện mối liên hệ giữa  $S_a$  với chế độ công nghệ là phù hợp.

Các kết quả nghiên cứu trên phù hợp với một số kết quả đã công bố với các bột kim loại khi in 3D. Cụ thể như sau:

Các nghiên cứu thực nghiệm với bột kim loại CoCr trên máy in SLM đạt được giá trị độ nhám bề mặt Ra từ 3,382 đến 7,410  $\mu\text{m}$ , với công suất laser từ 88 đến 106 W và tốc độ in (vận tốc quét) từ 250 đến 1000 mm/s [86].

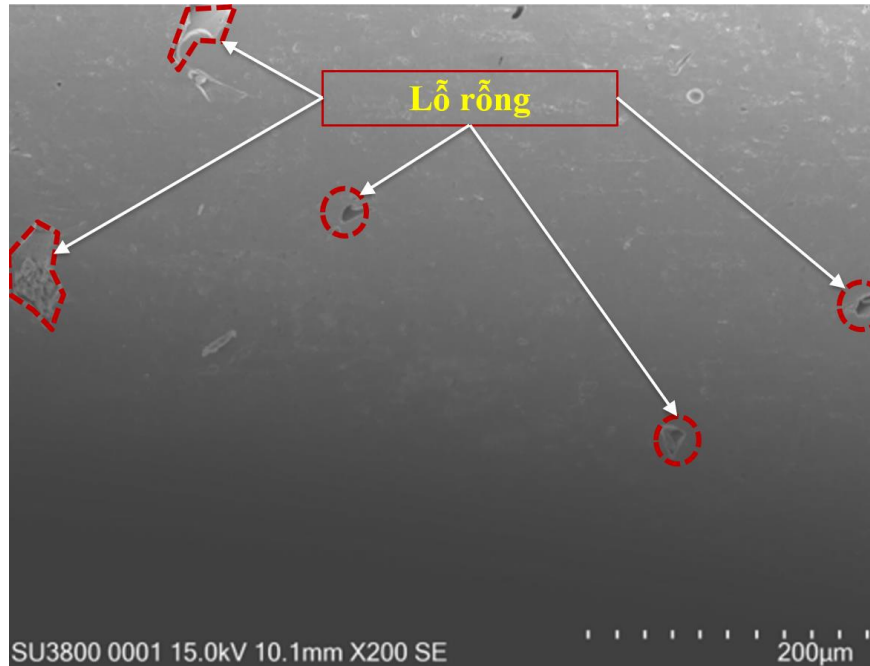
Ảnh hưởng của phân bố kích thước hạt đến chất lượng bề mặt và cơ tính của các mẫu in bằng phương pháp SLM cũng đã được tiến hành khảo sát. Kết quả nghiên cứu trên 3 loại bột thép 316L có phân bố kích thước hạt tăng dần cho thấy: khi chiều dày lớp in  $t = 0,03$  mm và mật độ năng lượng thể tích E nằm trong khoảng 50 đến 100 J/mm<sup>3</sup>, loại bột có kích thước hạt nhỏ (kích thước trung bình 15,12  $\mu\text{m}$ ) sẽ cho Ra trong khoảng 5 đến 7  $\mu\text{m}$ ; trong khi loại bột có kích thước lớn (kích thước trung bình 37,70  $\mu\text{m}$ ) sẽ cho Ra trong khoảng 8 đến 13  $\mu\text{m}$  [87].

Vật liệu bột Ti6Al4V với kích thước hạt trung bình 23,37  $\mu\text{m}$  in bằng phương pháp SLM cũng đã được nghiên cứu. Trong đó, bộ thông số công nghệ in bao gồm công suất laser thay đổi từ 100 đến 200 W, vận tốc in từ 600 đến 1600 mm/s và chiều dày lớp in được giữ cố định ở mức  $t = 0,03$  mm. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng giá trị Ra thu được nằm trong khoảng từ 5 đến 15  $\mu\text{m}$ . Khi công suất laser tăng, giá trị Ra giảm; ngược lại, khi vận tốc in tăng thì Ra cũng tăng. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, sự thay đổi của chiều dày lớp in chưa được đưa vào đánh giá [88].

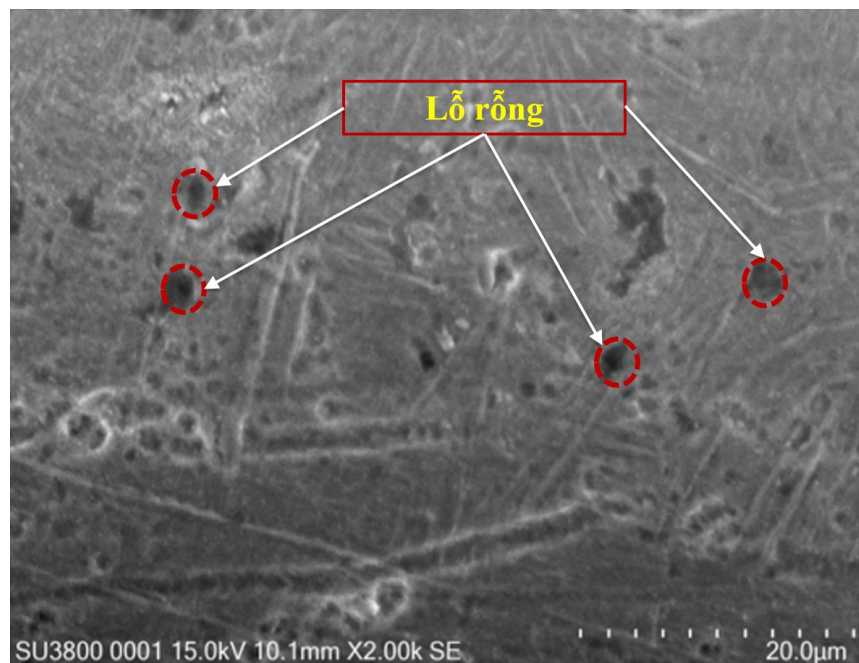
Trong công nghệ SLM, chiều dày lớp in thông thường được thiết lập từ 20 đến 100  $\mu\text{m}$ , tương ứng với dải bột nguyên liệu có kích thước hạt 20–45  $\mu\text{m}$ . Về mặt nguyên lý, lớp in càng dày thì đòi hỏi công suất laser càng cao để vật liệu được nung chảy hoàn toàn; ngược lại, lớp in mỏng lại là chìa khóa giúp bề mặt chi tiết đạt độ nhẵn mịn tốt hơn. Nhằm tối ưu hóa chất lượng bề mặt, Abele và cộng sự đã phát triển phương pháp in SLM vi mô ( $\mu\text{SLM}$ ) sử dụng chiều dày lớp dưới 20  $\mu\text{m}$  kết hợp với bột siêu mịn (kích thước trung bình  $< 10$   $\mu\text{m}$ ). Minh chứng cho hiệu quả của phương pháp này, các thực nghiệm in  $\mu\text{SLM}$  trên bột thép 316L ( $D_{50} = 3,62$   $\mu\text{m}$ ) với lớp in siêu mỏng 7  $\mu\text{m}$ , dải công suất 25–40 W và vận tốc 200–2500 mm/s đã ghi nhận được giá trị độ nhám Ra cực tiểu ở mức 3,51  $\mu\text{m}$  [89].

### 4.3.3. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới độ xốp

Từ kết quả kiểm tra cấu trúc tế vi của các mẫu in, các khuyết tật như lỗ hổng do bột vật liệu không được in, hạt vật liệu không nóng chảy vẫn còn tồn tại ở một số mẫu in. Kết quả cụ thể thể hiện ở Bảng 4.16.

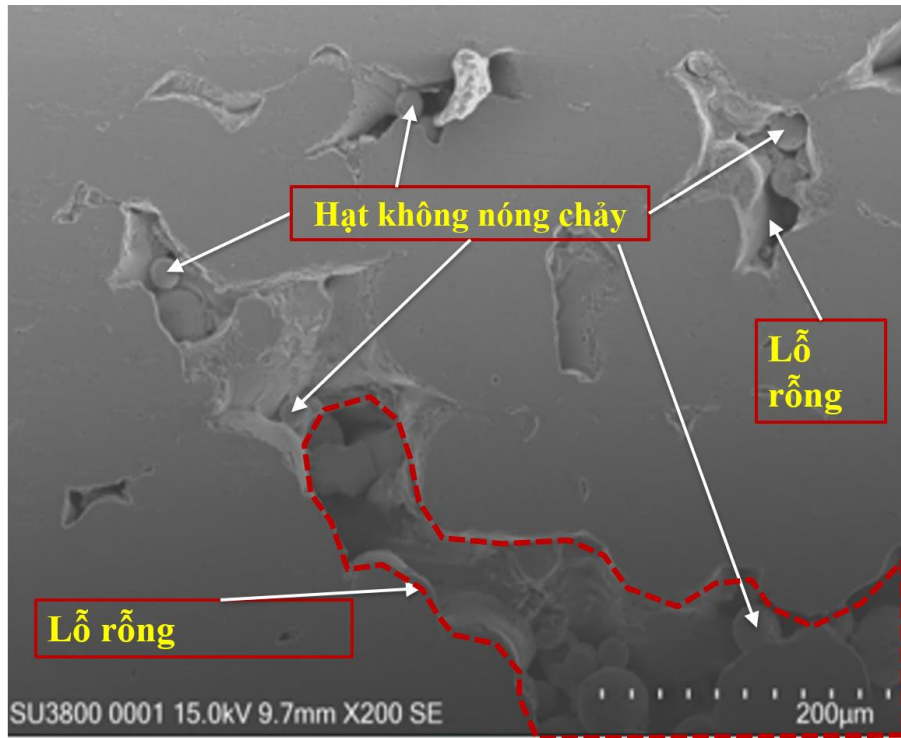


a – ở độ phóng đại X200

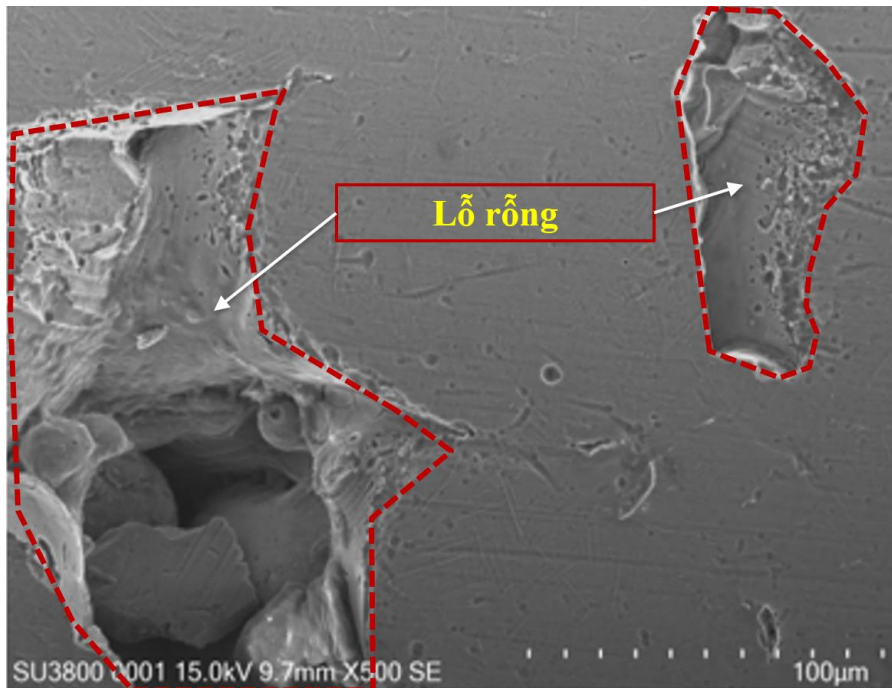


b – ở độ phóng đại X2000

**Hình 4.26. Cấu trúc tế vi của mẫu in số 2 với độ xốp 3.78%**



a – ở độ phóng đại X200



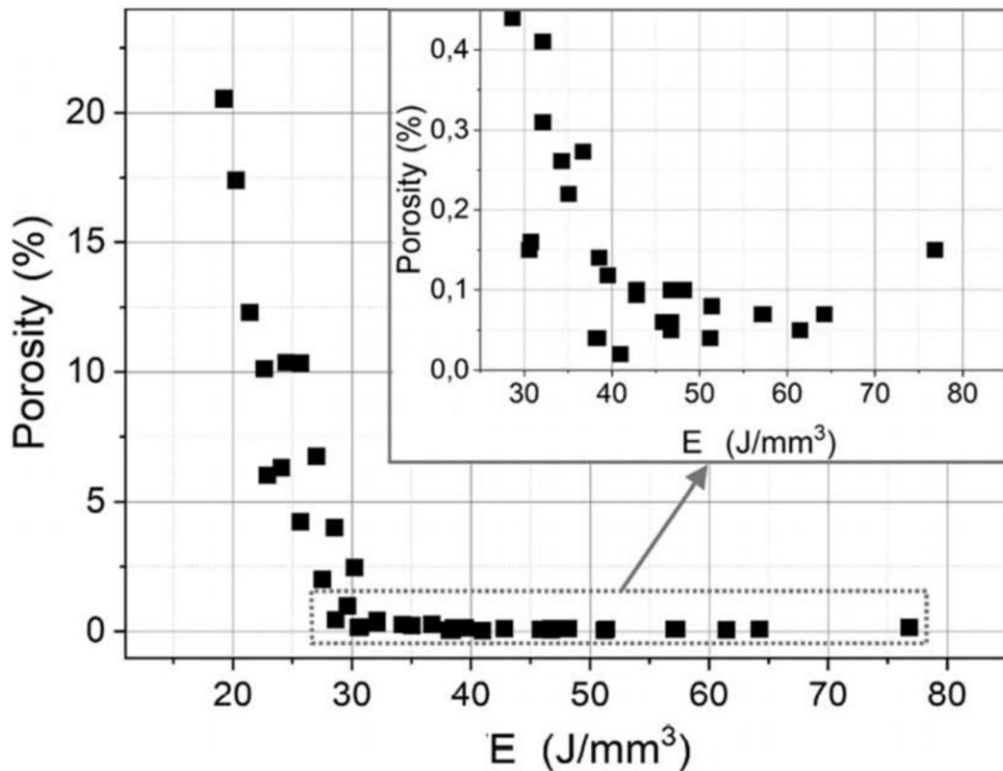
b – ở độ phóng đại X500

**Hình 4.27. Cấu trúc tế vi của mẫu in số 7 với độ xốp 12.375%**

Độ xốp và các khuyết tật khi in phụ thuộc rất lớn vào bộ thông số công nghệ in và được thể hiện thông qua mối liên hệ giữa năng lượng thể tích laser ( $E$ ) với độ xốp và các khuyết tật. Cụ thể: giá trị  $E$  được tính như sau:  $E = \frac{U}{V \cdot t \cdot h}$

Trong đó  $V$  là vận tốc in,  $t$  là độ dày lớp in và  $h$  là khoảng cách đường in.

Từ năng lượng thể tích laser ta có thể thấy rằng khi  $V$  lớn,  $t$  lớn,  $h$  lớn thì năng lượng laser nhỏ sẽ dẫn đến độ xốp lớn và tồn tại các khuyết tật khi in. Ngược lại, khi công suất nguồn laser lớn, tốc độ in, chiều sâu in nhỏ thì độ xốp và các khuyết tật in giảm. Cơ chế này đã được một số tác giả đã nghiên cứu với vật liệu thép 316L [90]. Theo các nghiên cứu này, giá trị độ xốp  $< 0,1\%$  và các khuyết tật in giảm khi năng lượng laser đạt được  $65 \text{ J/mm}^3$  được thể hiện trong Hình 4.28.



**Hình 4.28. Đồ thị mối liên hệ độ xốp và năng lượng thể tích laser**

Trong nghiên cứu này cơ chế trên cũng được lặp lại, với bộ thông số đã thiết lập, nghiên cứu sinh tính được  $E = 73.1 \text{ J/mm}^3$

Các khuyết tật có thể nhận thấy trong Hình 4.26 và 4.27 bao gồm:

Lỗ rỗng méo mó, góc cạnh, có bột kẹt bên trong: Khuyết tật thiếu chảy, do thiếu năng lượng ( $E$  thấp). Khi năng lượng đầu vào không đủ, nhiệt độ vùng kim loại lỏng không đạt mức tối ưu khiến độ nhớt của chất lỏng cao và khả năng thẩm

ướt kém. Bề nóng chảy lúc này có kích thước quá nông và hẹp, không đủ sức thâm nhập vào lớp vật liệu rắn đã in bên dưới, đồng thời không lan hoàn toàn tới đường quét lân cận. Sự thiếu hụt dòng chảy lỏng để điền đầy các khoảng trống dẫn đến việc hình thành các hốc rỗng méo mó, góc cạnh nằm kẹt giữa các ranh giới lớp hoặc ranh giới đường quét. Do nhiệt năng kém, các hạt bột kim loại tại vùng này không thể nóng chảy, bị mắc kẹt lại nguyên vẹn bên trong các hốc rỗng này.

Lỗ tròn to, sâu thẳm (như cái giếng), không có bột: Khuyết tật lỗ khóa, do thừa năng lượng làm bốc hơi (E lớn). Nhiệt lượng dư thừa và tập trung làm nhiệt độ vũng lỏng vượt quá điểm sôi của hợp kim, dẫn đến hiện tượng kim loại bị bốc hơi cục bộ. Sự bay hơi này sinh ra một lực đẩy mạnh. Áp suất này nén trực tiếp lên bề mặt chất lỏng, khoét một hố hẹp và sâu cắm thẳng xuống đáy vũng chảy (tạo hình dáng như một chiếc lỗ khóa). Do dòng chảy của vũng kim loại lỏng ở chế độ này rất hỗn loạn, thành chất lỏng bao quanh lỗ khóa rất dễ bị mất ổn định và sụp đổ, bít kín phần miệng lỗ phía trên. Lượng khí/hơi kim loại đang tồn tại bên trong bị nhốt chặt lại ở đáy vũng chảy. Khi quá trình làm nguội diễn ra nhanh chóng, chúng tạo thành các lỗ xóp lớn, sâu thẳm, nhẵn bóng và hoàn toàn không có hạt bột.

Lỗ tròn xoe, nhỏ, nhẵn mịn, nằm rải rác ngẫu nhiên: Khuyết tật rỗ khí, do khí mắc kẹt không kịp thoát ra. Trong quá trình in SLM, nguồn khí sinh ra có thể đến từ 3 nguồn chính: Khí bảo vệ (Argon/Nitơ) bị kẹt sẵn bên trong các hạt bột rỗng ruột (sinh ra từ công đoạn chế tạo bột bằng phương pháp nguyên tử hóa khí); Khí trong buồng in bị cuốn vào vũng chảy do sự nhiễu loạn của dòng đối lưu Marangoni; Khí sinh ra do phản ứng bốc hơi của hơi ẩm, tạp chất bám trên bề mặt hạt bột.

Một số nhận xét về đặc điểm cấu trúc tế vi như sau:

- Khi chiều dày lớp in lớn  $t = 0.06$  mm, với công suất nguồn laser nhỏ  $U = 150$  W và vận tốc in lớn  $V = 1500$  mm/s, tồn tại nhiều khuyết tật bên trong chi tiết in như lỗ hồng lớn, hạt kim loại.

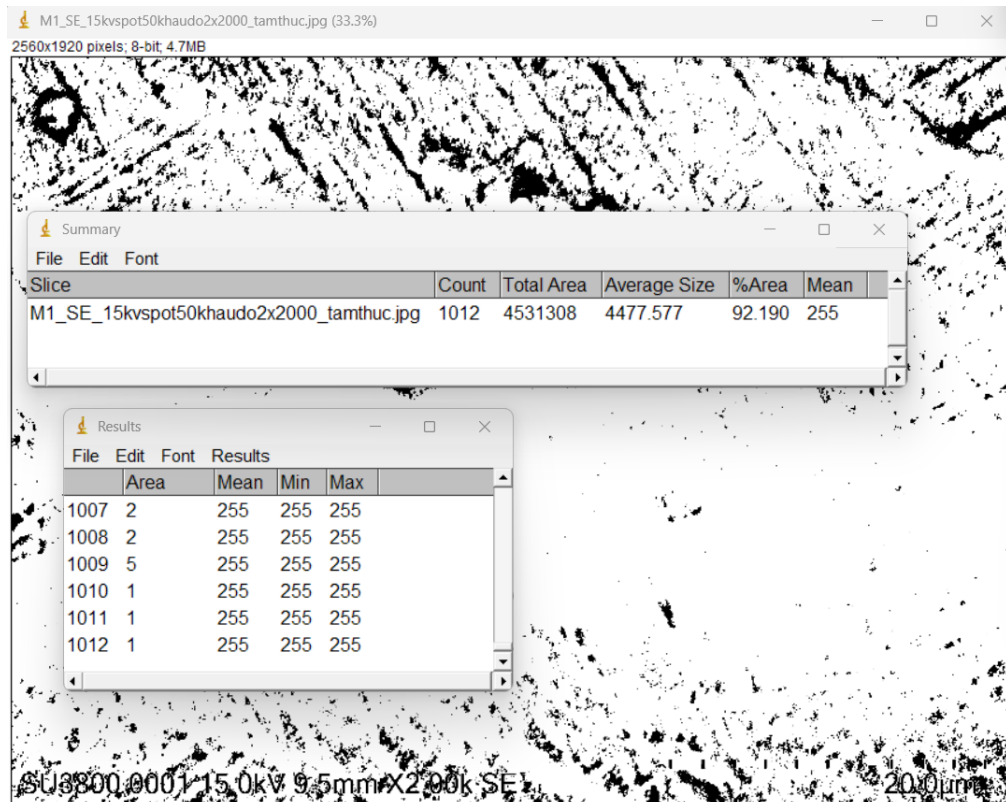
- Khi chiều dày lớp in lớn  $t = 0.06$  mm, với công suất nguồn laser lớn  $U = 350$  W và vận tốc in lớn  $V = 1500$  mm/s, tồn tại nhiều khuyết tật bên trong chi tiết in như vết nứt, lỗ hồng.

- Khi chiều dày lớp in nhỏ  $t = 0.03$  mm, cấu trúc vật liệu đạt được đồng đều hơn, có tồn tại một số lỗ hổng với kích thước nhỏ.

- Xét trong mối liên hệ với giá trị độ nhám bề mặt của các mẫu in, mẫu in số 2 có giá trị độ nhám nhỏ nhất (bề mặt mịn)  $R_a = 3.319$   $\mu\text{m}$  với chế độ in công suất nguồn laser 350 W, vận tốc in  $V = 400$  mm/s, chiều dày lớp in  $t = 0.03$  mm, tương ứng với cấu trúc tế vi đồng đều nhất, có một số ít các lỗ hổng nhỏ (Hình 4.26). Mẫu in số 7 có giá trị độ nhám lớn nhất (bề mặt thô)  $R_a = 24.025$   $\mu\text{m}$  với chế độ in công suất nguồn laser 150 W, vận tốc in  $V = 1500$  mm/s, chiều dày lớp in  $t = 0.06$  mm, tương ứng với cấu trúc tế vi có nhiều khuyết tật như lỗ hổng lớn, hạt kim loại (Hình 4.27). Độ xốp là một chỉ tiêu quan trọng ảnh hưởng đến cơ tính của sản phẩm in. Công thức xác định độ xốp (%) như sau:

$$\text{Độ xốp (\%)} = \frac{\text{Diện tích lỗ rỗng}}{\text{Tổng diện tích ảnh của mẫu}} * 100\%$$

Sử dụng phần mềm ImageJ để tính diện tích lỗ rỗng, diện tích ảnh, các kết quả cho các mẫu in như sau:



**Bảng 4.16. Kết quả đo độ xốp của các mẫu in**

Mẫu in	Công suất nguồn laser U (W)	Vận tốc in V (mm/s)	Chiều dày lớp in t (mm)	Độ xốp (%)
1	150	400	0.03	<b>7.810</b>
2	350	400	0.03	<b>3.780</b>
3	150	1500	0.03	<b>4.581</b>
4	350	1500	0.03	<b>7.022</b>
5	150	400	0.06	<b>7.345</b>
6	350	400	0.06	<b>5.565</b>
7	150	1500	0.06	<b>12.375</b>
8	350	1500	0.06	<b>9.548</b>
9	250	950	0.045	<b>3.563</b>

**Nhận xét kết quả thí nghiệm trên bảng 4.16:** độ xốp tại 2 mẫu 7 và 8 cao.

Nhưng 7 mẫu còn lại đạt độ xốp. Vậy có thể kết luận: Chế độ công nghệ ổn định

Mô hình hồi quy độ xốp được biểu diễn dạng hàm mũ như sau:

$$P = zU^lV^ft^w \quad (4.3)$$

Trong đó z, l, f, w là các thông số mô hình từ thực nghiệm.

Logarit hai vế của phương trình 4.3 ta có:

$$\ln(P) = \ln(z) + l \ln(U) + f \ln(V) + w \ln(t) \quad (4.4)$$

**Bảng 4.17: Giá trị của các thông số mô hình độ xốp**

U	V	t	P	ln(U)	ln(V)	ln(t)	ln(P)
150	400	0.03	7.81	5.011	5.991	-3.507	2.055
350	400	0.03	3.78	5.858	5.991	-3.507	1.330
150	1500	0.03	4.581	5.011	7.313	-3.507	1.522
350	1500	0.03	7.022	5.858	7.313	-3.507	1.949
150	400	0.06	7.345	5.011	5.991	-2.813	1.994
350	400	0.06	5.565	5.858	5.991	-2.813	1.716
150	1500	0.06	12.375	5.011	7.313	-2.813	2.516
350	1500	0.06	9.548	5.858	7.313	-2.813	2.256
250	950	0.045	3.563	5.521	6.856	-3.101	1.271

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \ln U1 & \ln V1 & \ln t1 \\ 1 & \ln U2 & \ln V2 & \ln t2 \\ 1 & \ln U3 & \ln V3 & \ln t3 \\ 1 & \ln U4 & \ln V4 & \ln t4 \\ 1 & \ln U5 & \ln V5 & \ln t5 \\ 1 & \ln U6 & \ln V6 & \ln t6 \\ 1 & \ln U7 & \ln V7 & \ln t7 \\ 1 & \ln U8 & \ln V8 & \ln t8 \\ 1 & \ln U9 & \ln V9 & \ln t9 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} \ln P1 \\ \ln P2 \\ \ln P3 \\ \ln P4 \\ \ln P5 \\ \ln P6 \\ \ln P7 \\ \ln P8 \\ \ln P9 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 5.011 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -3.507 \\ 1 & 5.011 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 5.991 & -2.813 \\ 1 & 5.011 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.858 & 7.313 & -2.813 \\ 1 & 5.521 & 6.856 & -3.101 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} 2.055 \\ 1.33 \\ 1.522 \\ 1.949 \\ 1.994 \\ 1.716 \\ 2.516 \\ 2.256 \\ 1.271 \end{bmatrix}$$

$$\beta = [3.909, -0.284, 0.181, 0.548]$$

$$z = 49.853; l = -0.284; f = 0.181; w = 0.548.$$

Độ xấp P':

$$P' = 49.853 U^{-0.284} V^{0.181} t^{0.548} \quad (4.5)$$

**Bảng 4.18: Giá trị thực nghiệm và giá trị chuẩn đoán độ xấp**

U	V	t	P'	P	lnP'	lnP	RES	SSre	K
150	400	0.03	5.201	7.810	1.649	2.055	0.406	0.165	0.788
350	400	0.03	4.089	3.780	1.408	1.330	-0.079	0.006	3.242
150	1500	0.03	6.607	4.581	1.888	1.522	-0.366	0.134	2.441
350	1500	0.03	5.194	7.022	1.648	1.949	0.302	0.091	0
150	400	0.06	7.605	7.345	2.029	1.994	-0.035	0.001	0.323
350	400	0.06	5.978	5.565	1.788	1.716	-0.072	0.005	1.457
150	1500	0.06	9.660	12.375	2.268	2.516	0.248	0.061	5.353
350	1500	0.06	7.594	9.548	2.027	2.256	0.229	0.052	2.526
250	950	0.045	6.571	3.563	1.883	1.271	-0.612	0.375	3.459

Với P' là giá trị độ xấp tính theo mô hình hồi quy; P là giá trị độ xấp đo được từ thực nghiệm. RES là độ lệch giữa giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán. SSre là

biên phương của độ lệch. K là độ lệch của P so với P trung bình. Giá trị trung bình của P đo được từ thực nghiệm là 7.022 (%). Ta có tổng của RES là 0.021; tổng của SSre là J = 0.891; tổng độ lệch so với P trung bình là S = 19.589. Hệ số  $r^2 = 1 - (J/S) = 0.95451$ . Giá trị  $r^2$  rất gần tới 1 thể hiện độ chính xác của mô hình cao. Mô hình thể hiện mối liên hệ giữa P với chế độ công nghệ là phù hợp.

#### 4.4. Chế độ công nghệ in tối ưu

##### 4.4.1. Chế độ công nghệ in tối ưu với đơn mục tiêu về chất lượng

Trong xem xét chế độ công nghệ để đạt được đơn mục tiêu về chỉ tiêu chất lượng như độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất; hoặc độ nhám bề mặt nhỏ nhất; hoặc độ xốp nhỏ nhất. Các hàm hồi quy được sử dụng bao gồm:

Độ sai lệch hình dạng:

$$D = 376.908 U^{0.162} V^{-0.595} t^{1.217} \rightarrow \min$$

Độ nhám bề mặt  $R_a$ :

$$R_a = 1.0005 U^{-0.329} V^{0.781} t^{0.397} \rightarrow \min$$

Độ xốp:

$$P = 49.853 U^{-0.284} V^{0.181} t^{0.548} \rightarrow \min$$

Với các điều kiện biên:

$$150 \leq U \leq 350$$

$$400 \leq V \leq 1500$$

$$0.03 \leq t \leq 0.06$$

Xét về độ sai lệch hình dạng, trên cơ sở mối liên hệ giữa D với U, V, t ta xét dấu của các mũ:

- $U^{0.162}$  tăng theo U (mũ dương): muốn nhỏ D cần chọn U nhỏ;
- $V^{-0.595}$  giảm theo V (mũ âm): muốn nhỏ D cần chọn V lớn;
- $t^{1.217}$  tăng theo t (mũ dương): muốn nhỏ D cần chọn t nhỏ.

Vì vậy tối ưu nằm ở biên:  $U = 150$ ,  $V = 1500$ , và  $t = 0.03$ . Thay vào ta có giá trị  $D_{\min} = 0.153$  mm.

Ứng dụng Minitab-19 ta có kết quả sau: Thông số công nghệ để đạt được độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất:  $U = 150$  W;  $V = 1500$  mm/s, và  $t = 0.03$  mm.

#### Parameters

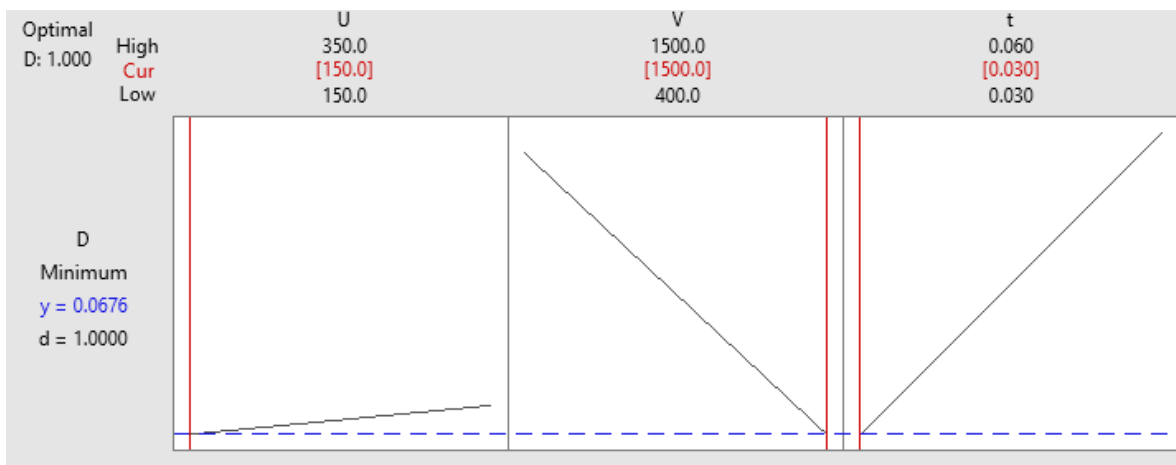
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
D	Minimum		0.15	0.8	1	1

### Variable Ranges

Variable	Values
U	(150, 350)
V	(400, 1500)
t	(0.03, 0.06)

### Solution

Solution	U	V	t	D Fit	Composite Desirability
1	150	1500	0.03	0.0676329	1



**Hình 4.29. Kết quả tối ưu đơn mục tiêu D**

Xét về độ nhám, trên cơ sở mối liên hệ giữa  $R_a$  với U, V, t ta xét dấu của các mũ:

- $U^{-0.329}$  giảm theo U (mũ âm): muốn nhỏ  $R_a$  cần chọn U lớn;
- $V^{0.781}$  tăng theo V (mũ dương): muốn nhỏ  $R_a$  cần chọn V nhỏ;
- $t^{0.397}$  tăng theo t (mũ dương): muốn nhỏ  $R_a$  cần chọn t nhỏ.

Vì vậy tối ưu nằm ở biên:  $U = 350$ ,  $V = 400$ , và  $t = 0.03$ . Thay vào ta có giá trị  $R_{a\ min} = 3.916\ \mu\text{m}$ .

Ứng dụng Minitab-19 ta có kết quả sau: Thông số công nghệ để đạt được độ nhám nhỏ nhất:  $U = 350\ \text{W}$ ;  $V = 400\ \text{mm/s}$ , và  $t = 0.03\ \text{mm}$ .

### Response Optimization: Ra

#### Parameters

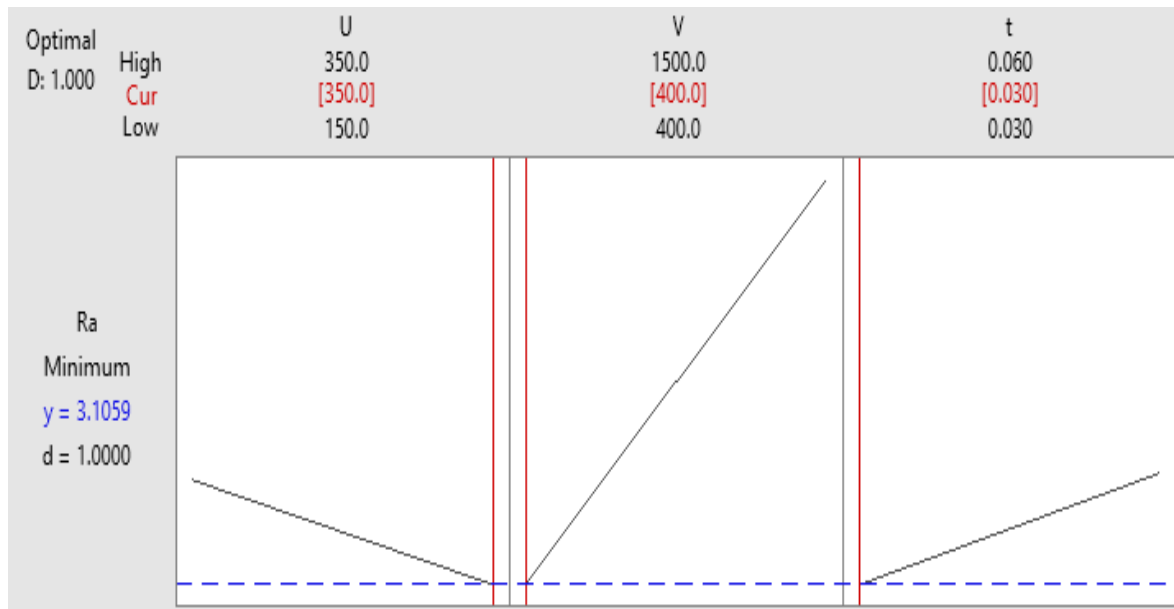
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra	Minimum		3.9	15.5	1	1

## Variable Ranges

Variable	Values
U	(150, 350)
V	(400, 1500)
t	(0.03, 0.06)

## Solution

Solution	U	V	t	Ra Fit	Composite Desirability
1	350	400	0.03	3.10594	1



**Hình 4.30. Kết quả tối ưu đơn mục tiêu  $R_a$**

Xét về độ xấp, trên cơ sở mối liên hệ giữa P với U, V, t ta xét dấu của các mũ:

- $U^{-0.284}$  tăng theo U (mũ âm): muốn nhỏ P cần chọn U lớn;
- $V^{0.181}$  giảm theo V (mũ dương): muốn nhỏ P cần chọn V nhỏ;
- $t^{0.548}$  giảm theo t (mũ dương): muốn nhỏ P cần chọn t nhỏ.

Vì vậy tối ưu nằm ở biên:  $U = 350$ ,  $V = 400$ , và  $t = 0.03$ . Thay vào ta có giá trị  $P = 4,089\%$

Ứng dụng Minitab-19 ta có kết quả sau: Thông số công nghệ để đạt được độ xấp nhỏ nhất:  $U = 350$  W;  $V = 400$  mm/s, và  $t = 0.03$  mm.

### Parameters

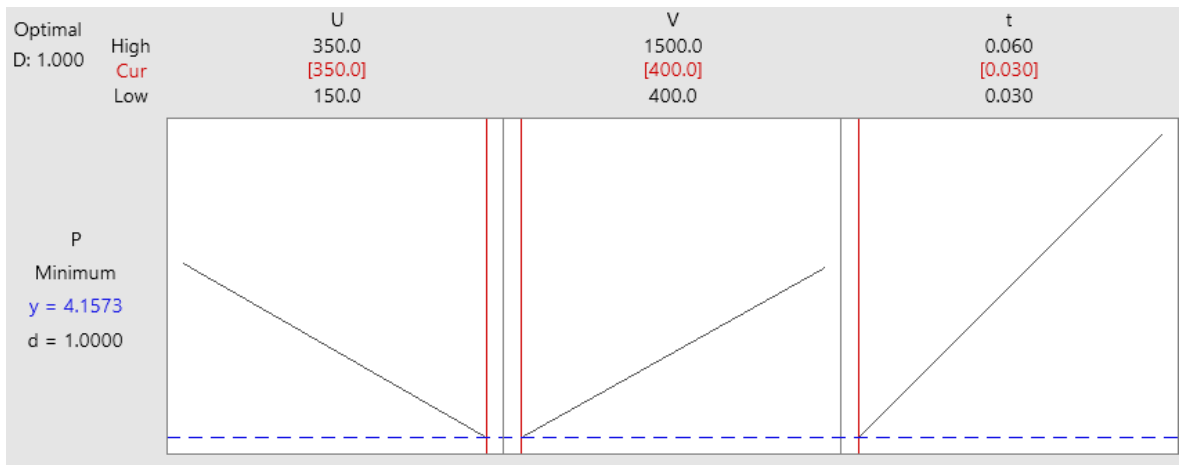
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
P	Minimum		4.21158	9.36693	1	1

### Variable Ranges

Variable	Values
U	(150, 350)
V	(400, 1500)
t	(0.03, 0.06)

### Solution

Solution	U	V	t	P Fit	Composite Desirability
1	350	400	0.03	4.15733	1



**Hình 4.31. Kết quả tối ưu đơn mục tiêu P**

#### 4.4.2. Chế độ công nghệ in tối ưu với đa mục tiêu về chất lượng

Trong xem xét chế độ công nghệ để đạt được đa mục tiêu về chỉ tiêu chất lượng như độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất, độ nhám bề mặt nhỏ nhất, và độ xốp nhỏ nhất.

$$\begin{cases} D = 376.908 U^{0.162} V^{-0.595} t^{1.217} \rightarrow \min \\ Ra = 1.0005 U^{-0.329} V^{0.781} t^{0.397} \rightarrow \min \\ P = 49.853 U^{-0.284} V^{0.181} t^{0.548} \rightarrow \min \end{cases}$$

## Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra	Minimum		4.05681	18.2748	1	1
D	Minimum		0.15334	0.8892	1	1
P	Minimum		4.21158	9.3669	1	1

## Variable Ranges

Variable	Values
U	(150, 350)
V	(400, 1500)
t	(0.03, 0.06)

## Solution

Solution	U	V	t	Ra Fit	D Fit	P Fit	Composite Desirability
1	341.919	400	0.03	4.06501	0.335110	4.20157	0.909592

Các bước giải bài toán tối ưu đa mục tiêu trong Minitab:

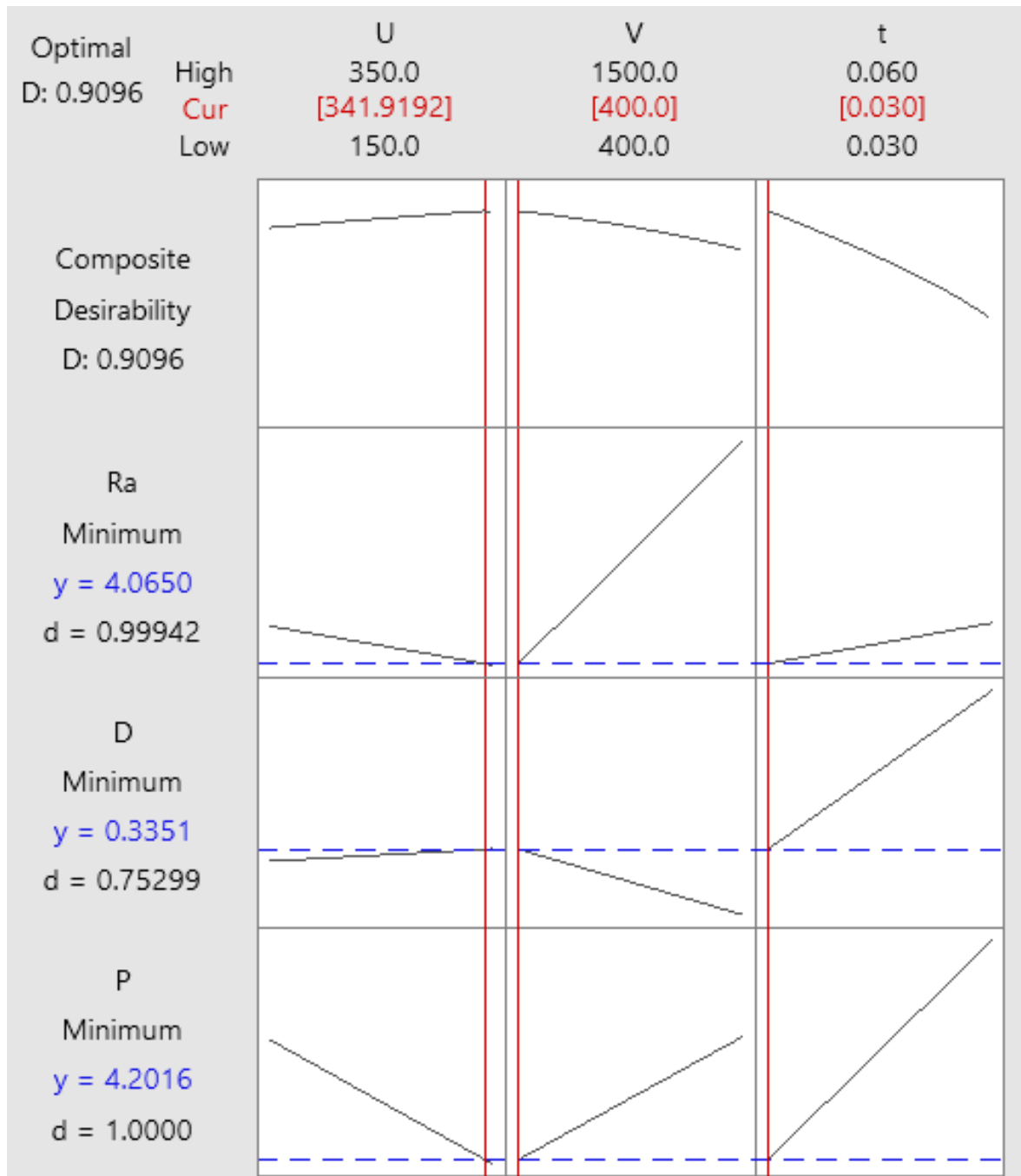
1. Xây dựng mô hình (Fit Model).
2. Thiết lập mục tiêu (Goals).
3. Chạy tối ưu hóa.
4. Phân tích kết quả bao gồm:

Composite Desirability (D): Giá trị tổng thể, càng gần 1, kết quả càng tối ưu.

Optimal Settings: Biểu đồ hiển thị giá trị các yếu tố đầu vào (cột màu đỏ) để đạt được kết quả tốt nhất.

Interactive Plot: Có thể kéo các đường màu đỏ trên đồ thị để kiểm tra sự thay đổi của mục tiêu khi thay đổi yếu tố đầu vào.

Từ đó thu được kết quả như Hình 4.32.



**Hình 4.32. Kết quả tối ưu đa mục tiêu**

Thông số công nghệ để đạt được bài toán đa mục tiêu:  $U = 341.919$  W;  
 $V = 400$  mm/s, và  $t = 0.03$  mm.

## KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Bằng quy hoạch thực nghiệm, nghiên cứu đã làm rõ quy luật: công suất laser ( $U$ ) cao kết hợp với chiều dày lớp in ( $t$ ) mỏng giúp giảm đáng kể độ nhám bề mặt, sai lệch hình dạng và khuyết tật trong cấu trúc tế vi. Dựa trên các quy luật này, bộ thông số in tối ưu đơn và đa mục tiêu (sai lệch, độ nhám và độ xốp nhỏ nhất). Các kết quả cụ thể là:

- 1- Từ quy hoạch thực nghiệm đã xây dựng được mối quan hệ phụ thuộc của các yếu tố đầu ra với các tham số đầu vào: Giá trị độ sai lệch hình dạng nhỏ đạt được khi vận tốc in lớn; trong khi giá trị chiều dày lớp in nhỏ, độ sai lệch hình dạng giảm khi vận tốc in tăng và giá trị công suất nguồn laser trung bình trong phạm vi khảo sát là từ 150 W đến 350 W.
- 2- Với chiều dày lớp in  $t = 0.03$  mm, chi tiết in sẽ có độ sai lệch hình dạng nhỏ hơn 0.2 mm khi giá trị vận tốc in nằm trong khoảng  $V = 1250$  đến 1500 mm/s và giá trị công suất nguồn laser nằm trong khoảng  $U = 150$  đến 350 W.
- 3- Với  $t = 0.05$  mm và  $t = 0.06$  mm, để đạt được độ sai lệch hình dạng nhỏ hơn  $D = 0.3$  mm, cần có giá trị  $U$  và  $V$  lớn. Trong nghiên cứu này, độ sai lệch hình dạng lớn nhất là 0.682 mm tương ứng với các thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser  $U = 150$  W, vận tốc in  $V = 400$  mm/s và chiều dày lớp in  $t = 0.06$  mm.
- 4- Các thông số quy trình in tối ưu đạt được với  $t = 0.03$  mm,  $U = 350$  W và  $V = 1500$  mm/s tương ứng với  $D = 0.1207$  mm.
- 5- Khi  $V$ ,  $t$  tăng đều cho giá trị độ nhám bề mặt  $R_a$  lớn, trong khi tăng công suất nguồn laser  $U$  sẽ cho giá trị độ nhám bề mặt nhỏ. Khi tăng giá trị công suất nguồn laser  $U$  khả năng nóng chảy kim loại sẽ tốt hơn nên chất lượng bề mặt thu được của chi tiết sau in sẽ tốt hơn.
- 6- Xét trong mối liên hệ với giá trị độ nhám bề mặt của các mẫu in, mẫu in có giá trị độ nhám nhỏ nhất (bề mặt mịn)  $R_a = 3.319$   $\mu\text{m}$  với chế độ in công suất nguồn laser  $U = 350$  W, vận tốc in  $V = 400$  mm/s, chiều dày lớp in  $t = 0.03$

mm, tương ứng với cấu trúc tế vi đồng đều nhất, có một số ít các lỗ hổng nhỏ. Mẫu in có giá trị độ nhám lớn nhất (bề mặt thô)  $R_a = 24.025 \mu\text{m}$  với chế độ in công suất nguồn laser 150 W, vận tốc in  $V = 1500 \text{ mm/s}$ , chiều dày lớp in  $t = 0.06 \text{ mm}$ , tương ứng với cấu trúc tế vi có nhiều khuyết tật như lỗ hổng lớn, hạt kim loại lớn.

- 7-** Trong xem xét chế độ công nghệ để đạt được đa mục tiêu về chỉ tiêu chất lượng như độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất, độ nhám bề mặt nhỏ nhất, và độ xốp nhỏ nhất, bộ thông số công nghệ để đạt được bài toán đa mục tiêu là:  $U = 350 \text{ W}$ ;  $V = 500 \text{ mm/s}$ , và  $t = 0.03 \text{ mm}$ .

## KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

### a) KẾT LUẬN CHUNG

Từ nội dung và kết quả đạt được của luận án, có thể rút ra các kết luận sau:

1 - Với đặc tính vật liệu, trường nhiệt thay đổi trạng thái pha của vật liệu đã được phân tích làm cơ sở xác định bộ thông số công nghệ phù hợp để đạt được nhiệt độ nóng chảy vật liệu Ti6Al4V là trên 1877 K và nhỏ hơn nhiệt độ bay hơi là 3533 K; mặt khác các tính chất nhiệt của vật liệu như nhiệt dung, hệ số dẫn nhiệt thay đổi theo nhiệt độ và trạng thái chuyển đổi pha cũng đã được xác định.

2 - Với phương pháp in SLM, cơ chế in SLM đã được phân tích để xác định các ứng xử cơ – nhiệt – hóa của vật liệu trong quá trình in. Xây dựng mô hình truyền nhiệt với các thông số chính bao gồm đặc tính vật liệu (nhiệt dung, hệ số dẫn nhiệt); chế độ in (vận tốc in, nguồn laser). Mặt khác, xác định được mô hình nhiệt và năng lượng nhiệt tổn hao.

3 - Với điều kiện in, các xử lý trước in (gia nhiệt bột in lên 200<sup>0</sup>C), các xử lý sau in (ủ cả mẫu in và tấm nền) đã được áp dụng nhằm giảm ứng suất dư do nhiệt.

4 - Với chế độ công nghệ in, bộ thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser, chiều dày lớp in, vận tốc in đã được nghiên cứu để xác định ảnh hưởng của bộ thông số công nghệ này tới độ nhám bề mặt; độ chính xác hình dạng, và đặc điểm cấu trúc tế vi. Với chế độ công nghệ in trong môi liên hệ với các chỉ tiêu chất lượng, các kết quả đạt được bao gồm:

- Thiết lập được phương trình truyền nhiệt khi in theo phương pháp in SLM, trong đó nguồn năng lượng tiêu hao đã được xác định. Phương trình truyền nhiệt với mô hình nguồn laser theo phân bố Gauss đã được sử dụng để sinh trường nhiệt độ khi in. Giá trị của trường nhiệt độ rất quan trọng, làm cơ sở để xác định năng lượng laser E và bộ thông số công nghệ in phù hợp.

- Thiết lập được mô hình toán thể hiện mối liên hệ giữa độ sai lệch hình dạng (D), độ nhám bề mặt ( $R_a$ ) và độ xốp với các thông số công nghệ in gồm công suất nguồn laser U; vận tốc in V (mm/s) và chiều dày lớp in t (mm).

- Xác định được bộ thông số công nghệ in tối ưu thảo mãn bài toán tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu và đạt được đồng thời độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất, độ nhám nhỏ nhất và độ chặt lớn nhất

***b) Hướng nghiên cứu tiếp theo:***

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu đã đạt được, nghiên cứu sinh sẽ tiến hành đánh giá tính chất cơ tính của lớp in. Từ đó tiến hành các nghiên cứu kiểm soát chất lượng ngay trong quá trình in với việc ứng dụng thông minh nhân tạo nhằm giảm thiểu lỗi khi in và tiến hành nghiên cứu in 3D các sản phẩm có bề mặt phức tạp.

## DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. Tran Ngoc Hien, **Nguyen Thai Son**, Prediction of part distortion in metal. 3D printing. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 6, năm 2021, trang 225-229
2. Ngoc-Hien Tran and **Thai-Son Nguyen**, “Calculating the Inherent Strain in 3D Printed Part Based on the Heat Affected Zone”, In: Long, B.T., et al. Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS 2022). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31824-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31824-5_12), Scopus.
3. **Nguyễn Thái Sơn**, Trần Ngọc Hiền, “Nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng các thông số công nghệ in 3D kim loại đến chất lượng sản phẩm in”, Tạp chí Cơ khí số 309, tháng 11, 2023, trang 116.
4. **Thai-Son Nguyen** and Ngoc-Hien Tran, “Study on optimization of 3D printing parameters for part quality”, Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development (MMMS2024), <https://doi.org/10.1007/978-031-93816-0-8>, Scopus.
5. Ngoc-Hien Tran, **Thai-Son Nguyen**, Chapter 6: Additive Manufacturing and 3D Printing Revolution in Industry 5.0. In Book: Digital Manufacturing in Industry 5.0; Publisher: Springer Nature; Editor: Dr. Yogesh Kumar Singla, Dr. Ashwani Kumar, Dr. Michael R. Maughan; ISBN-13.978-3031914997.
6. **Nguyễn Thái Sơn**, Nguyễn Chí Sáng, Trần Ngọc Hiền, Nghiên cứu mô phỏng phân bố nhiệt trong công nghệ sản xuất bồi đắp. Tạp chí Cơ khí Việt Nam; số 331, 2025, trang 202.
7. **T.S. Nguyen** and N. H. Tran, “An Experimental Investigation of the Shape Deviation of SLM Printed Parts”, Eng. Technol. Appl. Sci. Res., Scopus, vol. 15, no. 5, pp. 26757–26764, Oct. 2025. <https://doi.org/10.48084/etasr.12777>
8. **Thai-Son Nguyen**, Ngoc-Hien Tran, "Experimental Investigation of Surface Roughness and Microstructure Characterization of the SLM printed Parts". EUREKA: Physics and Engineering, Scopus, 5(60), 117-131. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003907>.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Phùng Anh Tiến, Công nghệ in 3D, Cục thông tin khoa học và công nghệ Quốc gia, 2015.
2. Varshney, A. K., Garg, A., Pandey, TR., Singhal, R. K., Singhal, R., and Sharma, H. (2024). The Development of Manufacturing Industry Revolutions from 1.0 to 5.0. *Journal of Informatics Education and Research*, 4(1), 1230-1242.
3. Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., and Dolen, M. (2017). The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.
4. Galantucci, L.M., Guerra, M.G., Dassisti, M., and Lavecchia, F. (2019). Additive Manufacturing: New Trends in the 4th Industrial Revolution. In: Monostori, L., Majstorovic, V.D., Hu, S.J., Djurdjanovic, D. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. AMP 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham.
5. Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Plessis, A.D. (2021). Basics of laser powder bed fusion. In: *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals* (eds. Igor Yadroitsev et al.). Elsevier.
6. Moghaddam, N.S., Jahadakbar, Amerinatanzi, A., and Elahinia, M. (2018). Recent Advances in Laser-Based Additive Manufacturing. In: *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts* (eds. Bian, L. et al.) Taylor & Francis.
7. Công nghệ in 3D - Xu hướng nghiên cứu công nghệ trên thế giới và một số ứng dụng tại Việt Nam, Trung tâm thông tin và thống kê khoa học và công nghệ, Sở khoa học và công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh, 2023.
8. Khorasani, A., Gibson, I., Veetil, J.K. et al. A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers. *Int J Adv Manuf Technol* 108, 191–209 (2020).
9. <https://www.aie.com.vn/in-3d-kim-loai-trong-nganh-hang-khong-vu-tru-tu-nhung-thanh-cong-ban-dau-den-su-chuyen-doi-cua-mot-nganh-cong-nghiep/>

10. Ma, L., Yu, S., Xu, X., Amadi, X. S. M., Zhang, J., and Wang, Z. (2023). Application of artificial intelligence in 3D printing physical organ models. *Materials Today Bio*, 23, 100792.
11. Kiran, M. B. (2021). Application of Artificial Intelligence in Additive Manufacturing- A Review. Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Singapore, March 7-11, 2575-2586.
12. Talaat, F. M., and Hassan, E. (2021). Artificial Intelligence in 3D Printing. In: A. E. Hassanien et al. (eds.), *Enabling Machine Learning Applications in Data Science, Algorithms for Intelligent Systems*, Springer.26
13. Goh, G.D., Sing, S.L., and Yeong, W.Y. (2021). A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges. *Artif Intell Rev* 54, 63–94.
14. Vrancken, B. (2016), Study of residual stresses in selective laser melting, Ph.D Dissertation.
15. Thomas, G.S., and Scott, A.G. (2016). In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing, *Spears and Gold Integrating Materials and Manufacturing Innovation* 5(2),1-25.
16. Martin, F., Radomila, K., Gianni, N., Ludvik, K. (2019). Microstructure and fatigue performance of SLM-fabricated Ti6Al4V alloy after different stress-relief heat treatments. *Transportation Research Procedia*, 40, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.005>
17. Karadag, A., Ulkir, O. (2025). Prediction of Dimensional Accuracy and Surface Quality in Additively Manufactured Biomedical Implants Using ANN. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 26, 1187–1213. <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01229-2>
18. Simoni, F., Huxol, A., Villmer, FJ. (2021). Improving surface quality in selective laser melting based tool making. *J Intell Manuf*, 32, 1927–1938. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01744-9>
19. Spierings, A.B., Herres, N., Levy, G. (2011). Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(3), 195-202. <https://doi.org/10.1108/13552541111124770>

20. Wang, D., Lv, J., Wei, X., Lu, D., Chen, C. (2023). Study on Surface Roughness Improvement of Selective Laser Melted Ti6Al4V Alloy. *Crystals*, 13(2): 306. <https://doi.org/10.3390/cryst13020306>
21. A. Karadag and O. Ulkir, "Prediction of dimensional accuracy and surface quality in additively manufactured biomedical implants using ANN," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 26, pp. 1187–1213, 2025.
22. S. Rouf, A. Raina, M.I.U. Haq, N. Naveed, S. Jeganmohan, and A.F. Kichloo, "3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 5, no. 3, pp. 143-158, 2022.
23. Y. Siyambaş and Y. Turgut, "Experimental investigation and optimization of the effects of manufacturing parameters on geometric tolerances in additive manufacturing of AlSi10Mg alloy," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.134, pp.415–429, 2024.
24. R. Sheshadri, M. Nagaraj, A. Lakshmikanthan, M.P.G. Chandrashekarappa, D.Y. Pimenov, K. Giasin, R.V.S. Prasad, and S. Wojciechowski, "Experimental investigation of selective laser melting parameters for higher surface quality and microhardness properties: Taguchi and super ranking concept approaches," *Journal of Materials Research and Technology*, vol.14, pp.2586-2600, 2021.
25. R. Biswal, A. Ganesan, "Experimental investigation of design parameters on geometrical accuracy of selective laser sintered parts," *Journal of Manufacturing Processes*, vol.108, pp.48-61, 2023.
26. A.D. Rizeal, D.C. Anghel, and D.M. Iordache, "Study of the deviation of shape for the parts obtained by additive manufacturing," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol.1009, 2021, 012050.
27. S. Feng, S. Chen, A.M. Kamat, R. Zhang, M. Huang, and L. Hu, "Investigation on shape deviation of horizontal interior circular channels fabricated by laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, vol.36, 2020, 101585.

28. R. Madaj, R. Kohar, F. Brumerick, and M. Veres, "Design study of hole types for improved cooling of experimental heatsinks manufactured by SLM technology using an AlSi10Mg alloy," *Applied Sciences*, vol. 15(4), 2025, 2118.
29. D. Bompos, J.C. Jacob, and J.M. Sprauel, "Shape distortion prediction in complex 3D parts induced during the selective laser melting process," *CIRP Annals*, vol.69(1), pp.517-520, 2020.
30. S. Pal, M. Milković, R. Ramadani et al., "Dimensional deviations in Ti-6Al-4V discs produced with different process parameters during selective laser melting," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.129, pp.5655–5669, 2023.
31. C. Herpel, A. Tasaka, S. Higuchi, D. Finke, R. Kühle, K. Odaka, S. Rues, C.J. Lux, S. Yamashita, P. Rammelsberg, and F.S. Schwindling, "Accuracy of 3D printing compared with milling - A multi-center analysis of try-in dentures," *Journal of Dentistry*, vol. 110, 2021.
32. PGS.TS. Trần Ngọc Hiền và cộng sự, Đề tài "Nghiên cứu thiết kế, chế tạo máy in 3D ứng dụng trong đào tạo", B2016-GHA-06.
33. TS. Đoàn Tất Khoa và cộng sự, Đề tài khoa học công nghệ cấp quốc gia: "Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo thiết bị bồi đắp trực tiếp kim loại bằng laser (DLMD)" mã số KC-4.0-15/19-2.
34. TS. Lê Văn Thảo và cộng sự, Đề tài "Nghiên cứu sử dụng rô bốt hàn có khí bảo vệ để in 3D các chi tiết kim loại từ quan điểm công nghệ, kinh tế, và môi trường", Nafosted.
35. Le Van Thao, A preliminary study on gas metal arc welding-based additive manufacturing of metal parts, *VNUHCM Journal of Science and Technology Development*, Vol. 23 No. 1 (2020), Page: 422-429.
36. TS. Lê Văn Thảo và cộng sự, Đánh giá độ chính xác hình học và hiệu quả sử dụng vật liệu khi tạo hình chi tiết côn rỗng từ thép hợp kim độ bền cao bởi công nghệ WAAM, *Tạp chí Khoa học và Công nghiệp Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 2025.
37. PGS. TS. Nguyễn Văn Cường và cộng sự, Ảnh hưởng của vật liệu in đến đặc tính cơ ngót trong in 3D kim loại bằng công nghệ ép đùn vật liệu, *Tạp chí cơ khí Việt Nam*, số 309, 2023.

38. <https://vtv.vn/suckhoe/Lần đầu tiên tại Việt Nam: Sử dụng mảnh ghép in 3D hợp kim Titanium thay thế xương chày mất đoạn>
39. <https://tamanhhospital.vn/BVĐK Tâm Anh phẫu thuật thay khớp gối, ghép xương cho bệnh nhi ung thư>
40. <https://vtv.vn/suckhoe/Lần đầu tiên thay xương khớp nhân tạo in 3D thành công cho bệnh nhân khuyết tật>.
41. Đặng Văn Nghìn và cộng sự, Tối ưu hóa thông số quá trình SLM, Hội nghị khoa học và công nghệ toàn quốc về cơ khí lần thứ V – VCME 2018.
42. Anh Tai Le, Van Huan Dau, Tien Dat Hoang, H. Nguyen-Xuan, Heat treatment of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting (SLM) for medical implant: A comprehensive review. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 36, 2025, 7643-7665.
43. Tran Hoang Son Lam, Jakub Mesicek, Le Tri Dung, Quoc-Phu Ma, Le Thai Hung, Jana Petru. Effect of heat treatment on the mechanical properties and microstructure of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy. *MM Science Journal*, 2025.
44. Nguyen Minh-Thuyet, Nguyen Hoang-Viet, Le Thai-Hung, Dang Quoc-Khanh, Kim Jin-Chun. Properties of the interface between the as-built Ti-6Al-4V sample and the Ti substrate in selective laser sintering. *International Journal of Modern Physics B*, vol.34, 2040137, 2020.
45. Nguyen Minh Thuyet, Viet Nguyen-Hoang, Jin-Chun Kim. The Microstructural Revolution of Ti-6Al-4V Specimens Fabricated by Selective Laser Sintering of Pre-alloyed Powders. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 2019, 57(3A):103.
46. PGS. TS Trịnh Văn Trung và cộng sự, Đặc tính của hợp kim Ti64 in 3D bằng công nghệ nung chảy laze chọn lọc, *Tạp chí khoa học và công nghệ đại học Thái Nguyên*, 2025.
47. Rasiya G., Shukla, A., Saran, K., Additive Manufacturing-A Review, *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47, 6896-6901.
48. Fu C.H., Guo Y.B., 3-Dimensional finite element modeling of selective laser melting Ti-6Al-4V alloy. *Proc 25th Annu Int Solid Freeform Fabr Symp*, 2014, 1129-1144.

49. Wego Wang (2011), Reverse engineering technology of reinvention, Taylor and Francis group.
50. Vinesh Raja, Kiran J. Fernandes (2008), Reverse engineering, Springer.
51. Trần Ngọc Hiền, Trần Ngọc Tú (2012), Tích hợp kỹ thuật thiết kế ngược và công nghệ tạo mẫu nhanh trong chế tạo cơ khí, Tạp chí Khoa học và Công nghệ- Đại học Đà Nẵng, Số 10(59).
52. “The complete Surface Finish Guide for 3D Printing”, 2020, Sculpteo SAS.
53. Śloderbach Z, Pająk J (2015), Determination of ranges of components of heat affected zone including changes of structure. Arch Metall Mater 60: 2608–2612. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0421>.
54. Hong-Seok Park, Hwa Seon Shin, Ngoc-Hien Tran. A new approach for calculating inherent strain and distortion in additive manufacturing of metal parts. Advanced Manufacturing Technology, 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1188961/v1>
55. Barabash OM, Horton JA, Babu SS, Vitek JM, David SA, Park JW, Ice GE, Barabash RI (2004), Evolution of dislocation structure in the heat affected zone of a nickel-based single crystal. J Appl Phys 96:3673–3679. <https://doi.org/10.1063/1.1777393>.
56. Hussain A, Choudhry MA, Hayat SS (2009) Effects of ordering on the thermal properties of an Ni<sub>3</sub>Al intermetallic alloy system: A molecular dynamics approach. Chinese Journal of Physics 47:344-354.
57. Loh, L., Chua, C. K., Yeong, W. Y., Song, J., Mapar, M., Sing, S. L., Liu, Z. H., and Zhang, D.Q., 2015, “Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 80, pp. 288–300.
58. X. Liang, Q. Chen, L. Cheng, Q. Yang, and A. To, “A Modified Inherent Strain Method for Fast Prediction of Residual Deformation in Additive Manufacturing of Metal Parts,” Feb. 2017.
59. Fu C.H., Guo Y.B., 3-Dimensional finite element modeling of selective laser melting Ti-6Al-4V alloy. Proc 25th Annu Int Solid Freeform Fabr Symp, 2014, 1129-1144.

60. Samad Z., Nor N.M., Fauzi E.R.I., Thermo-mechanical simulation of temperature distribution and prediction of heat-affected zone size in MIG welding process on aluminium alloy EN AW 6082-T6. *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.* 2019, 530.
61. Zhang Z., Huang Y., Kasinathan A.R., Shahabad S.I., Ali U., Mahmoodkhani Y., Toyserkani E., 3-Dimensional heat transfer modeling for laser powder-bed fusion additive manufacturing with volumetric heat sources based on varied thermal conductivity and absorptivity. *Opt. Laser Technol.* 2019, 109, 297–312.
62. Zarbane, K. (2023). Modeling and Simulation for Additive Manufactured Parts. In: Pei, E., et al. *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Springer Handbooks. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_14)
63. Liu S., Zhu H., Peng G., Yin J., Zeng X., Microstructure prediction of selective laser melting alsi10mg using finite element analysis. *Mater. Des.* 2018, 142, 319–328.
64. Leicht A, Fischer M, Klement U, Nyborg L, Hryha E (2021) Increasing the productivity of laser powder bed fusion for stainless steel 316L through increased layer thickness. *J Mater Eng Perform* 30:575–584. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05334-3>
65. I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava, and I. Smurov, “Single track formation in selective laser melting of metal powders,” *J Mater Process Technol*, vol. 210, no. 12, 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010.
66. N. K. Tolochko, T. Laoui, Y. V. Khlopkov, S. E. Mozzharov, V. I. Titov, and M. B. Ignatiev, “Absorptance of powder materials suitable for laser sintering,” *Rapid Prototyp J*, vol. 6, no. 3, 2000, doi: 10.1108/13552540010337029.
67. A. V. Gusarov and E. P. Kovalev, “Model of thermal conductivity in powder beds,” *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 80, no. 2, 2009, doi: 10.1103/physrevb.80.024202.
68. J. P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, and T. H. C. Childs, “Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing,” *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 56, no. 2, 2007, doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.004.

69. L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, and J. P. Kruth, "A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V," *Acta Mater*, vol. 58, no. 9, 2010, doi: 10.1016/j.actamat. 2010.02.004.
70. I. Setien, M. Chiumenti, S. Van der Veen, M. San Sebastian, F. Garcíandía, and A. Echeverría, "Empirical methodology to determine inherent strains in additive manufacturing," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 78, no. 7, 2019, doi: 10.1016/j.camwa.2018.05.015.
71. M. M. Shokrieh, S. M. Jalili, and M. A. Kamangar, "An eigen-strain approach on the estimation of non-uniform residual stress distribution using incremental hole-drilling and slitting techniques," *Int J Mech Sci*, vol. 148, 2018, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.08.035.
72. J. Wang, N. Ma, and H. Murakawa, "An efficient FE computation for predicting welding induced buckling in production of ship panel structure," *Marine Structures*, vol. 41, 2015, doi: 10.1016/j.marstruc. 2014. 12.007.
73. Antonio Costa, Gianluca Buffa, Dina Palmeri, Gaetano Pollara, Livan Fratini. "Hybrid prediction-optimization approaches for maximizing parts density in SLM of Ti6Al4V titanium alloy". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022.
74. Swee Leong Sing, Florencia Edith Wiria, Wai Yee Yeong. "Selective laser melting of titanium alloy with 50 wt% tantalum: Effect of laser process parameters on part quality". *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018.
75. X. Xing and L. Yang, "A Glance at the recent additive manufacturing research and development in China," in *Proceedings - 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2015*, 2020.
76. A. V. Agapovichev, V. V. Kokareva, V. G. Smelov, Anton Sotov. "Selective laser melting of titanium alloy: investigation of mechanical properties and microstructure". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016.
77. Fisher Ronald A. "Design of Experiments", Hafner press, 1971. London

78. William G. Cochran, Gertrude M. Cox., "Experimental Designs", John Wiley, New York, 1958.
79. John J.Z.L., William L.J., Rhima W.K., "Thermal expansion of liquid Ti-6Al-4V measured by electrostatic levitation". Applied Physics Letters, 2006, 89, 111913.
80. Nain V., "Efficient thermomechanical modeling of large parts fabricated by Directed Energy Deposition Additive Manufacturing processes", phd Thesis, 2023.
81. Nguyễn Hữu Lộc, Giáo trình Quy hoạch và phân tích thực nghiệm, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 2021.
82. G.W. Oehlert, A First Course in Design and Analysis of Experiments, Creative Commons, 2010.
83. Bruno G.R and Konrad W., "The power of DOE: How to increase experimental design success and avoid pitfalls", Journal of Science and Management, 2015, 8, 250-258.
84. S. Feng, S. Chen, A.M. Kamat, R. Zhang, M. Huang, and L. Hu, "Investigation on shape deviation of horizontal interior circular channels fabricated by laser powder bed fusion," Additive Manufacturing, vol.36, 2020, 101585.
85. S. Pal, M. Milković, R. Ramadani et al., "Dimensional deviations in Ti-6Al-4V discs produced with different process parameters during selective laser melting," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.129, pp.5655–5669, 2023.
86. Simoni, F., Huxol, A., Villmer, F.-J. "Improving surface quality in selective laser melting based tool making". Journal of Intelligent Manufacturing, 2021, 32 (7), 1927–1938. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01744-9>.
87. Spierings, A. B., Herres, N., Levy, G. "Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts". Rapid Prototyping Journal, 2011, 17 (3), 195–202. <https://doi.org/10.1108/13552541111124770>.

88. Wang, D., Lv, J., Wei, X., Lu, D., Chen, C. "Study on Surface Roughness Improvement of Selective Laser Melted Ti6Al4V Alloy". *Crystals*, 2023, 13 (2), 306. <https://doi.org/10.3390/cryst13020306>.
89. Abele, E., Kniepkamp, M. Analysis and optimisation of vertical surface roughness in micro selective laser melting. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2015, 3 (3), 034007. <https://doi.org/10.1088/2051-672x/3/3/034007>.
90. Alexander Leicht, Marie Fischer, Uta Klement, Lars Nyborg, and Eduard Hryha. "Increasing the Productivity of Laser Powder Bed Fusion for Stainless Steel 316L through Increased Layer Thickness". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020.
91. Vrancken, B. (2016), Study of residual stresses in selective laser melting, Ph.D Dissertation.
92. ASTM-<https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/additive-manufacturing-standards.html>

## PHỤ LỤC 1




Các tiêu chuẩn cho sản xuất bồi đắp [91], [92]




Nội dung	Tiêu chuẩn	
	Tiêu chuẩn cũ	Tiêu chuẩn cập nhật
Thuật ngữ	ASTM F2792-12a ISO 17296-1 ISO/ASTM 52921-13	ISO/ASTM52900-21
Quy trình/ Vật liệu	ISO 17296-2 (Phương pháp chứng nhận và chất lượng, Các yêu cầu với chi tiết AM, Phương pháp kiểm tra không phá hủy)	ISO/ASTM52901-16 ISO/ASTM52903-2-20 F3302-18 F3213-17 F3301-18a F3318-18 F2924-14(2021) F3001-14(2021) F3049-14(2021) F3091/F3091M-14(2021) F3056-14(2021) F3055-14a(2021) ISO/ASTM52930-21 ISO/ASTM52903-1-20 ISO/ASTM52925-22 ISO/ASTM52920-23 F3592-23 F3607-22 ISO/ASTM52935-23 F3184-16(2023) F3187-16(2023) ISO/ASTM52945-23 ISO/ASTM52908-23 ISO/ASTM52904-24

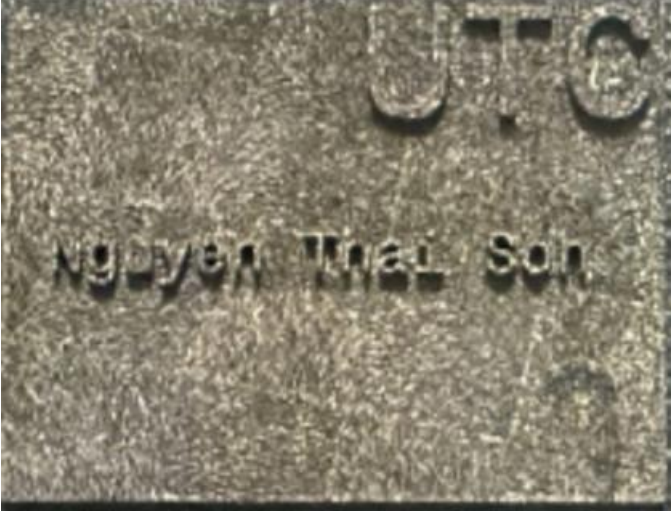
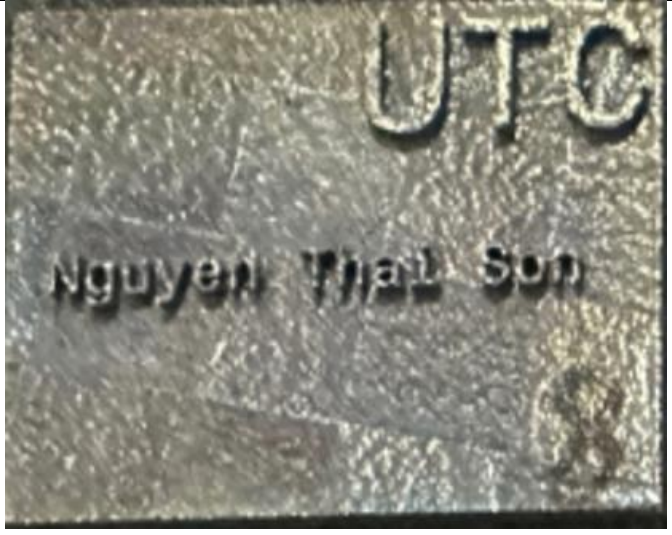

Phương pháp thử nghiệm	ISO 17296-3 (Các phương pháp thử nghiệm) F2921-11e3	ISO/ASTM52907-19 F2971-13(2021) ISO/ASTM52921-13(2019) F3571-22 F3606-22 F3522-22 F3624-23 F3626-23 ISO/ASTMTR52917-EB F3489-23 F3637-23 F3615-23 ISO/ASTM52902-23 ISO/ASTMTR52905-EB ISO/ASTM52927-24 ISO/ASTMTR52952-EB
Thiết kế/ Định dạng dữ liệu	ISO 17296-4 ISO/ASMT 52915-13 (cấu trúc dữ liệu cho các phương pháp AM)	ISO/ASTM52911-1-19 F2915-12 ISO/ASTM52950-21 ISO/ASTM52915-20 ISO/ASTM52910-18 F3413-19e1 F3530-22 F3529-21 ISO/ASTM52911-2-19 ISO/ASTM52911-3-23

## PHỤ LỤC 2

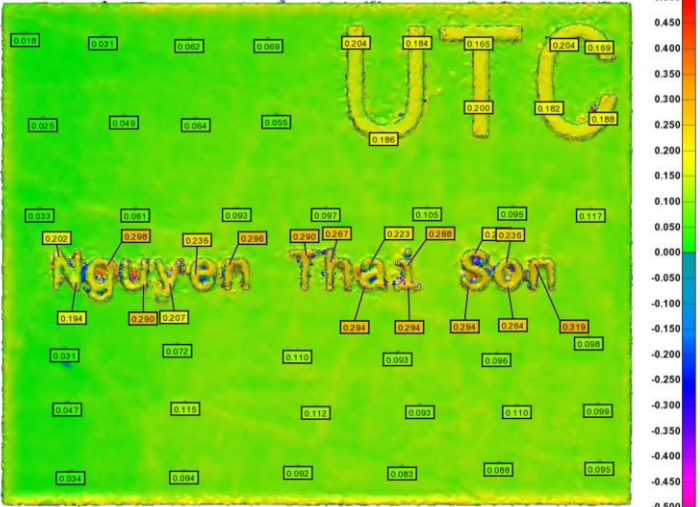
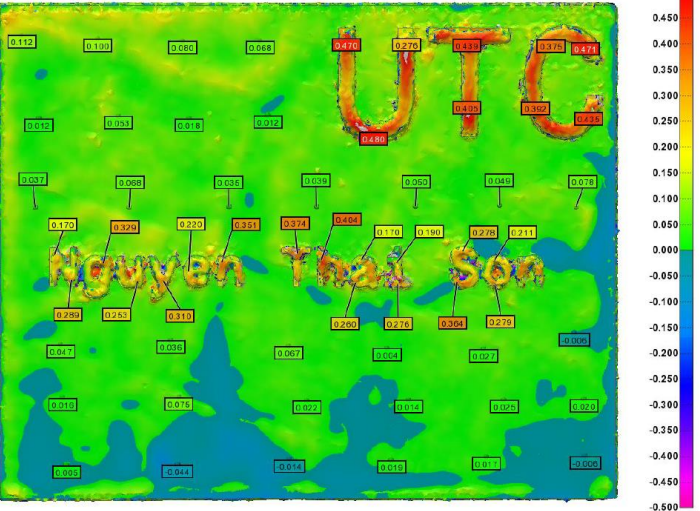
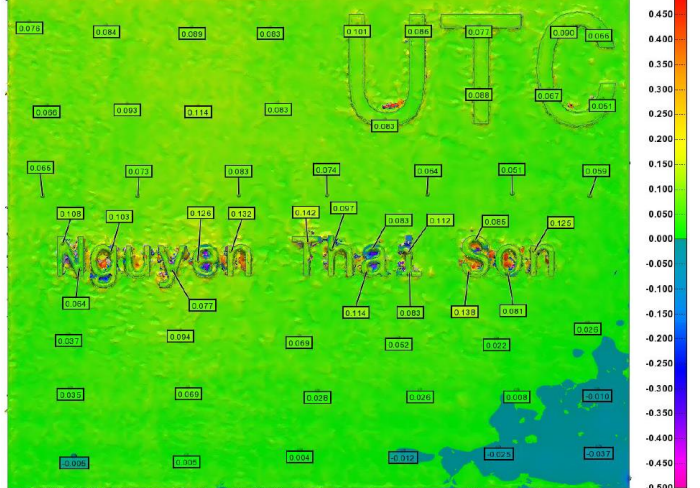
### *Phụ lục 2a Kết quả in các mẫu trên máy in FF-M180D*

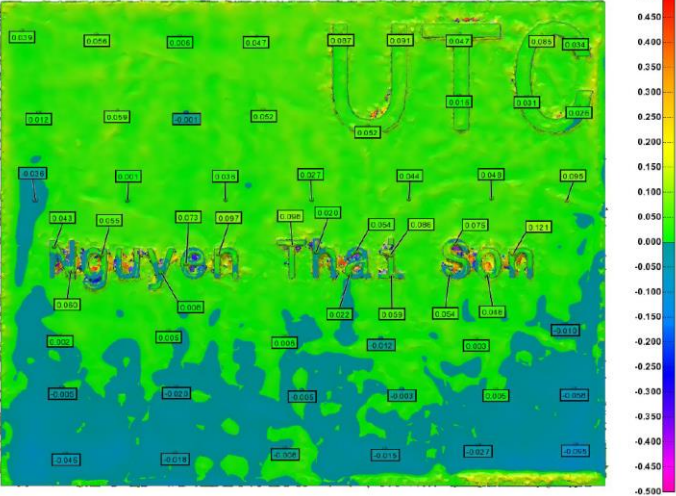
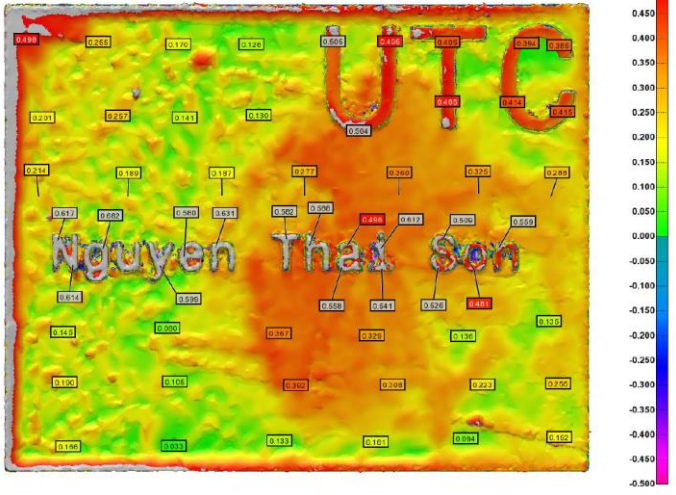
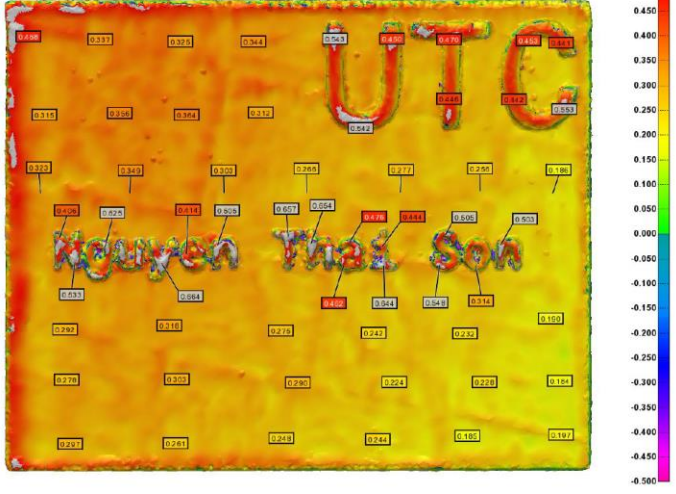
STT	Chế độ in	Mẫu in
1	t=0.03 mm U=150 W V=400 mm/s	
2	t=0.03 mm U=350 W V=400 mm/s	
3	t=0.03 mm U=150 W V=1500 mm/s	


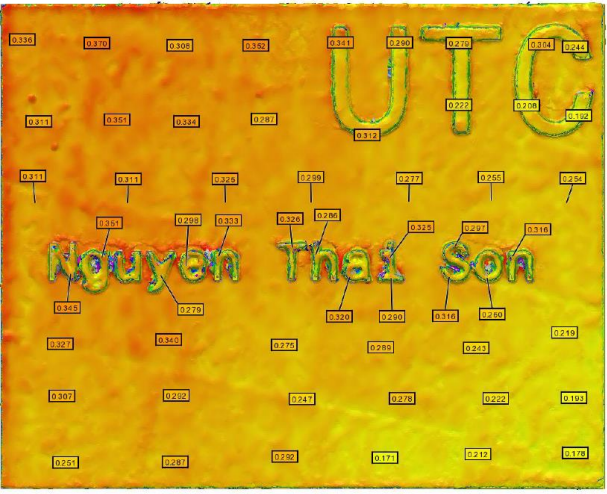
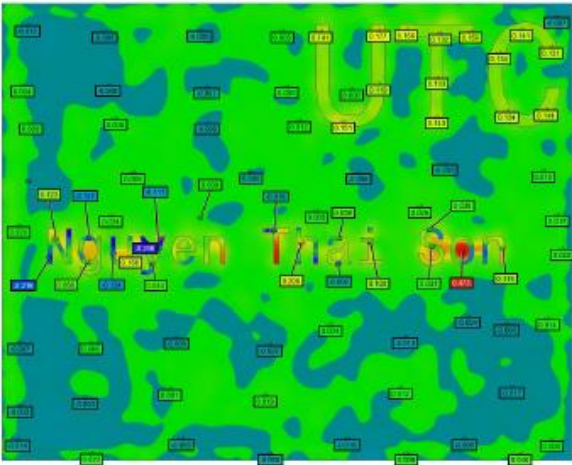
4	<p>t=0.03 mm  U=350 W  V=1500 mm/s</p>	
5	<p>t=0.06 mm  U=150 W  V=400 mm/s</p>	
6	<p>t=0.06 mm  U=350 W  V=400 mm/s</p>	

7	<p>t=0.06 mm  U=150 W  V=1500 mm/s</p>	
8	<p>t=0.06 mm  U=350 W  V=1500 mm/s</p>	
9	<p>t=0.045 mm  U=250 W  V=950 mm/s</p>	

*Phụ lục 2b Kết quả đo độ sai lệch hình dạng*

STT	Chế độ in	Mẫu đo
1	<p>t=0.03 mm U=150 W V=400 mm/s</p> <p>D=0.319 mm</p>	
2	<p>t=0.03 mm U=350 W V=400 mm/s</p> <p>D=0.6 mm</p>	
3	<p>t=0.03 mm U=150 W V=1500 mm/s</p> <p>D=0.45 mm</p>	

<p>4</p> <p><math>t=0.03</math> mm  <math>U=350</math> W  <math>V=1500</math> mm/s  <math>D=0.35</math> mm</p>		
<p>5</p> <p><math>t=0.06</math> mm  <math>U=150</math> W  <math>V=400</math> mm/s  <math>D=0.682</math> mm</p>		
<p>6</p> <p><math>t=0.06</math> mm  <math>U=350</math> W  <math>V=400</math> mm/s  <math>D=0.664</math> mm</p>		

<p>7</p> <p>t=0.06 mm U=150 W V=1500 mm/s</p> <p>D=0.61 mm</p>		
<p>8</p> <p>t=0.06 mm U=350 W V=1500 mm/s</p> <p>D=0.462 mm</p>		
<p>9</p> <p>t=0.045 mm U=250 W V=950 mm/s</p> <p>D=0.471 mm</p>		

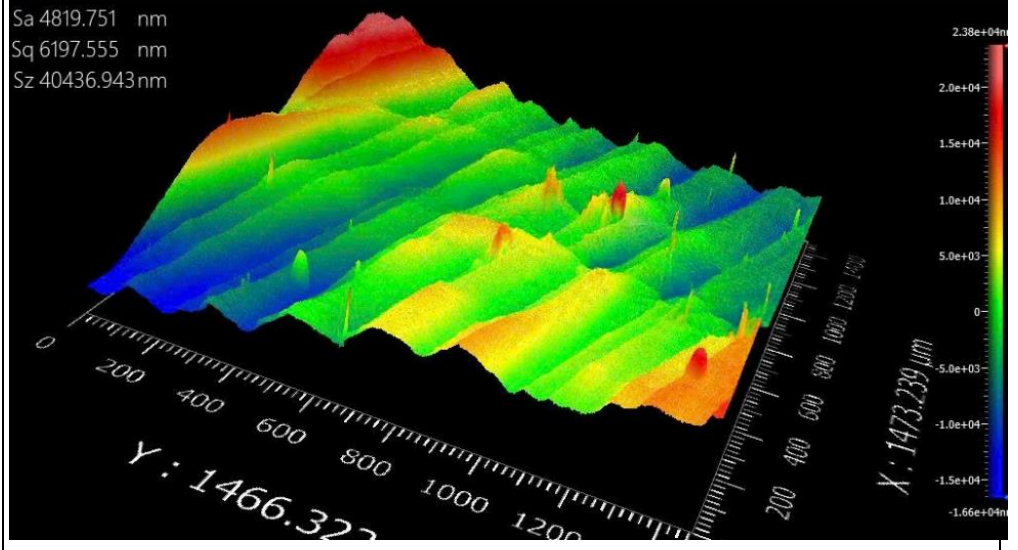
Phụ lục 2c Kết quả đo độ nhám

ST T	Chế độ in	Mẫu đo
1	t=0.03 mm U=150 W V=400 mm/s	<div data-bbox="507 405 1406 887"> <p>Sa 4078.142 nm Sq 5301.102 nm Sz 53346.807 nm</p> </div> <div data-bbox="507 887 1406 1368"> <p>Sa 5953.612 nm Sq 7335.756 nm Sz 54459.895 nm</p> </div>
		<div data-bbox="507 1408 1406 1890"> <p>Sa 4487.072 nm Sq 6096.382 nm Sz 68715.180 nm</p> </div>

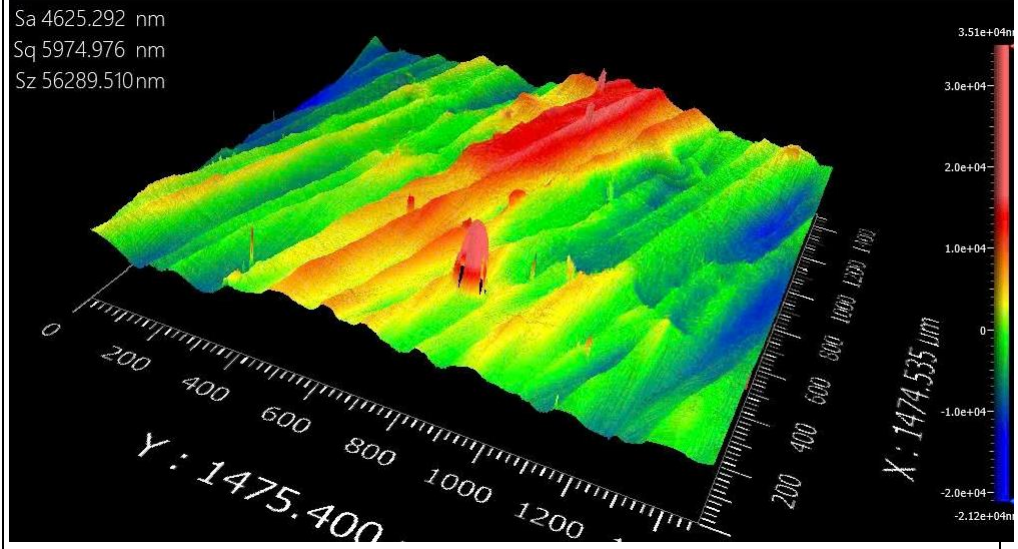
2

t=0.03  
mm  
U=350  
W  
V=400  
mm/s

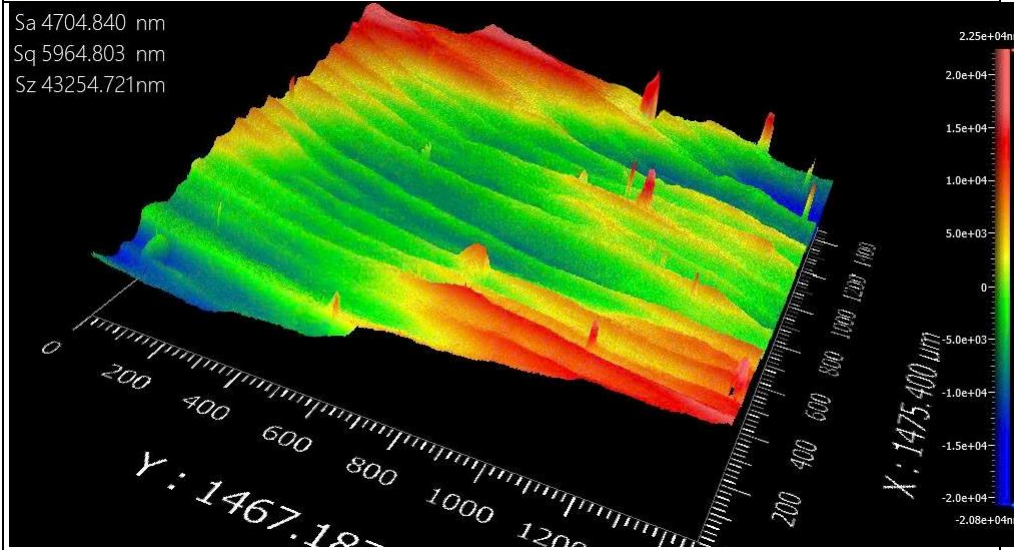
Sa 4819.751 nm  
Sq 6197.555 nm  
Sz 40436.943nm



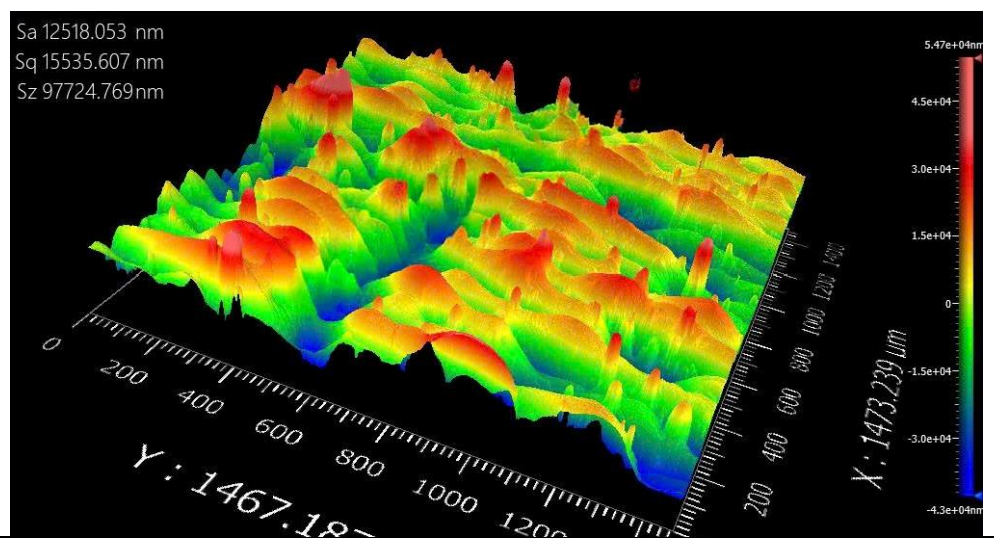
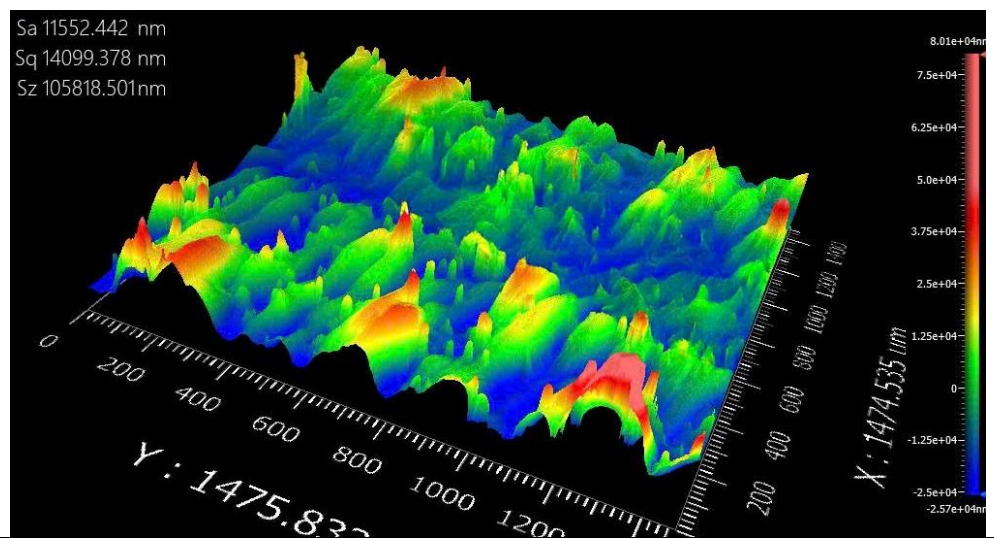
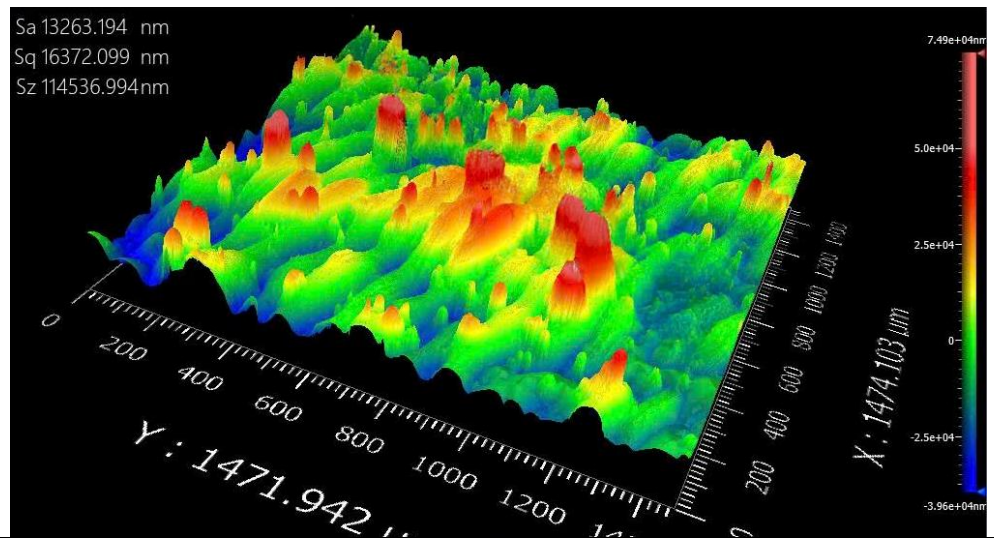
Sa 4625.292 nm  
Sq 5974.976 nm  
Sz 56289.510nm



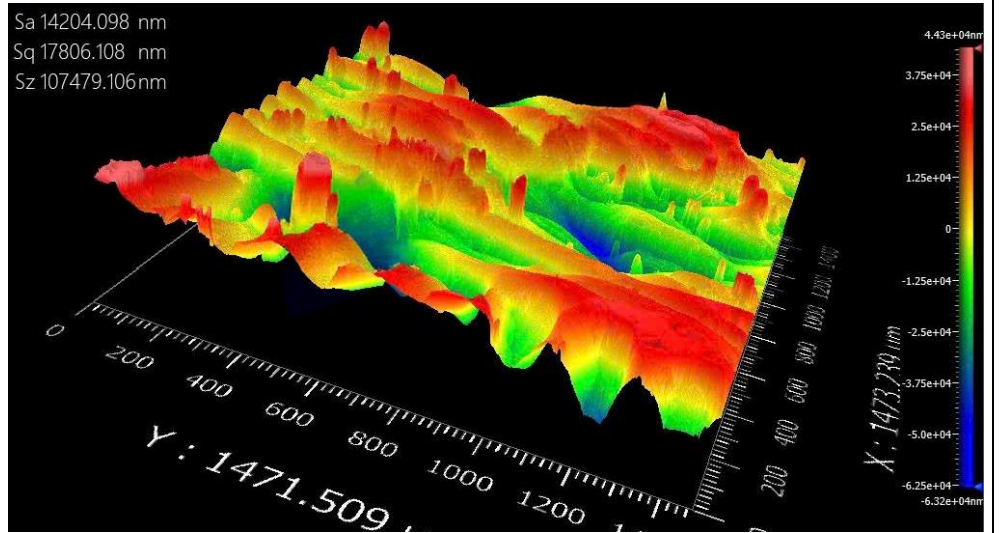
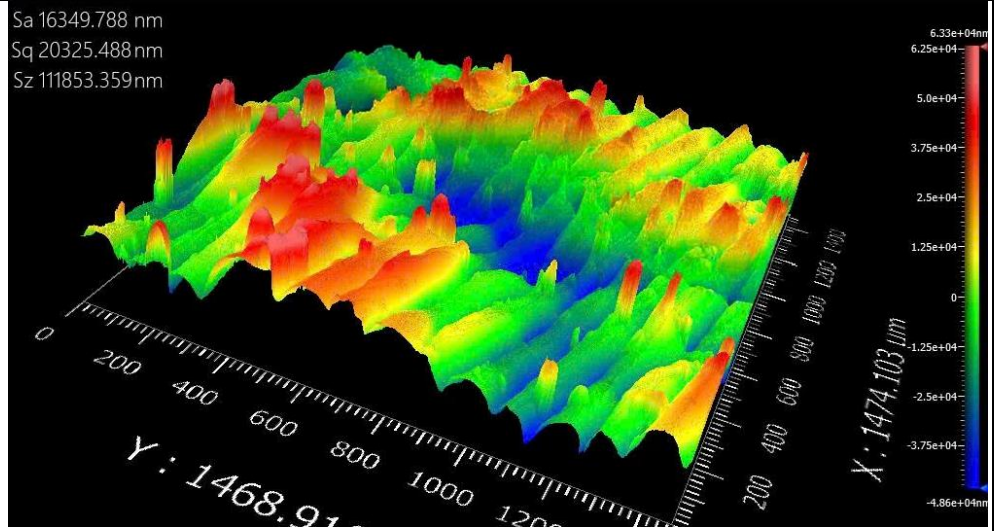
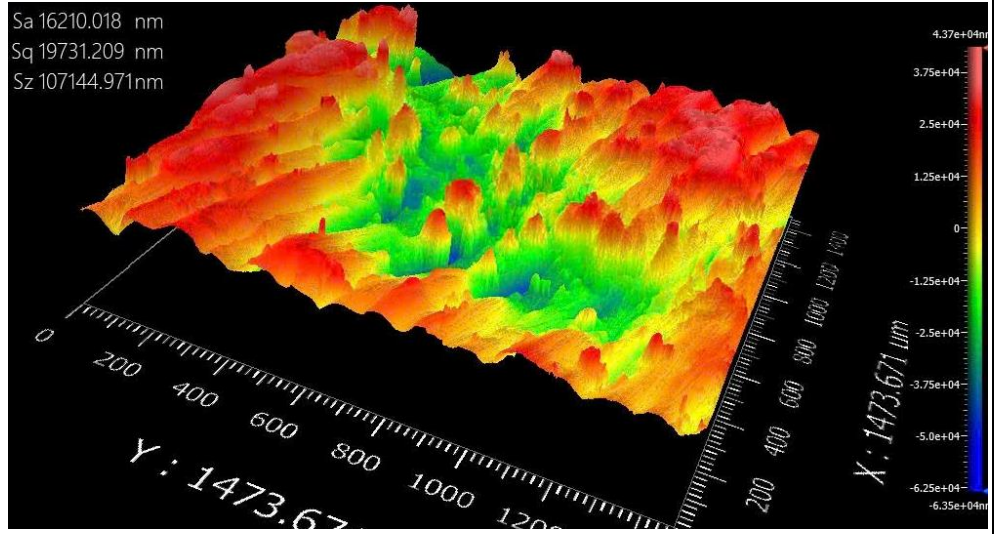
Sa 4704.840 nm  
Sq 5964.803 nm  
Sz 43254.721nm



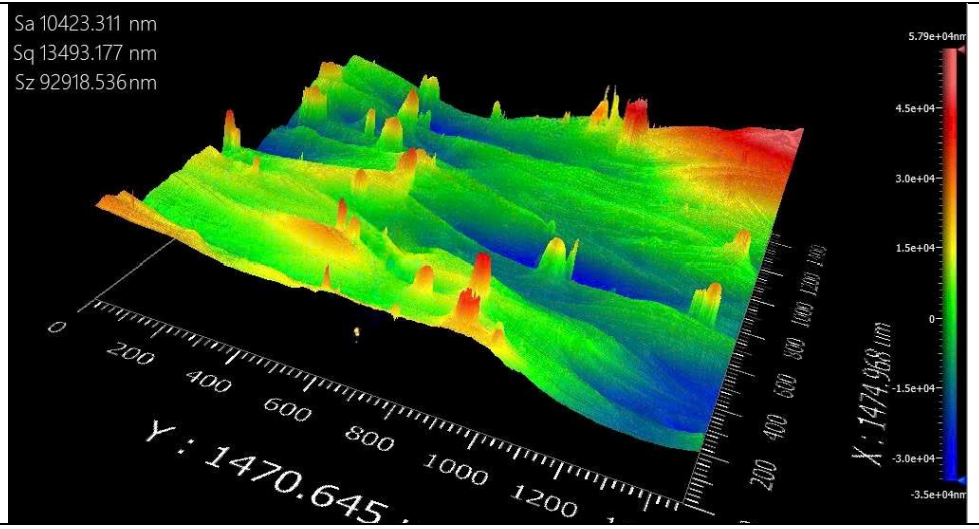
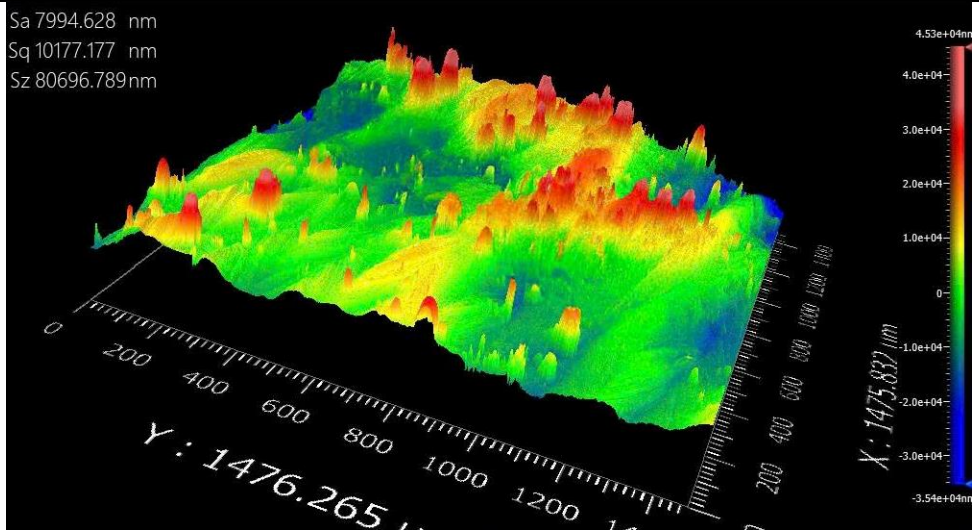
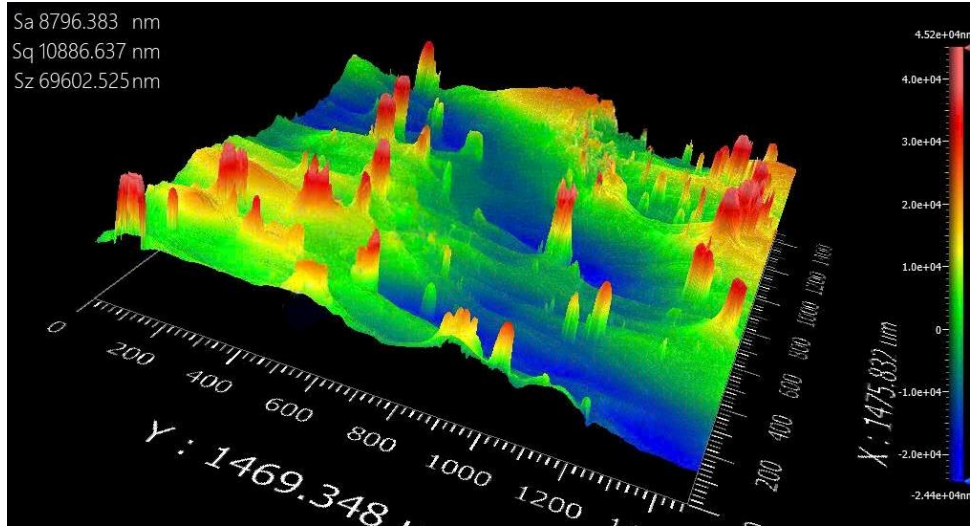
3 t=0.03  
mm  
U=150  
W  
V=150  
0 mm/s



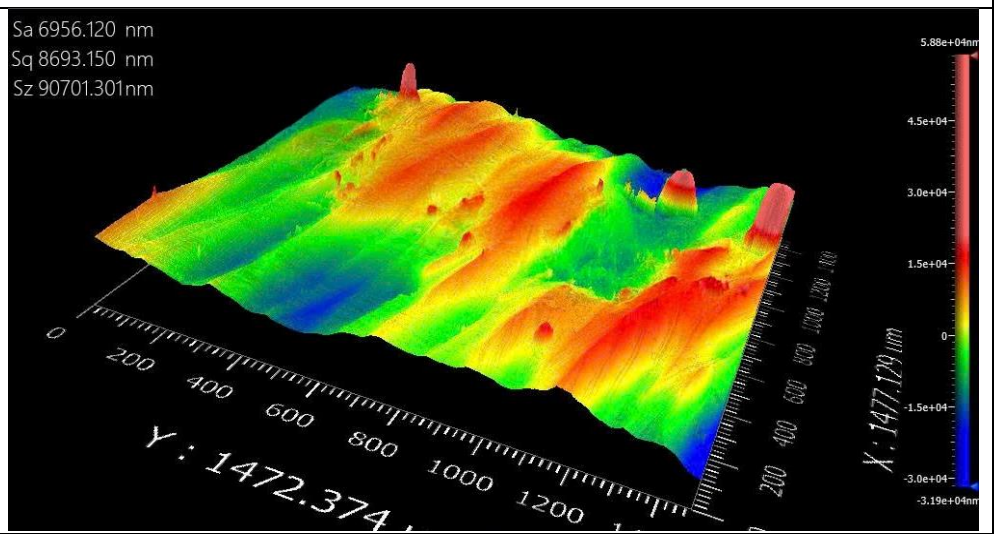
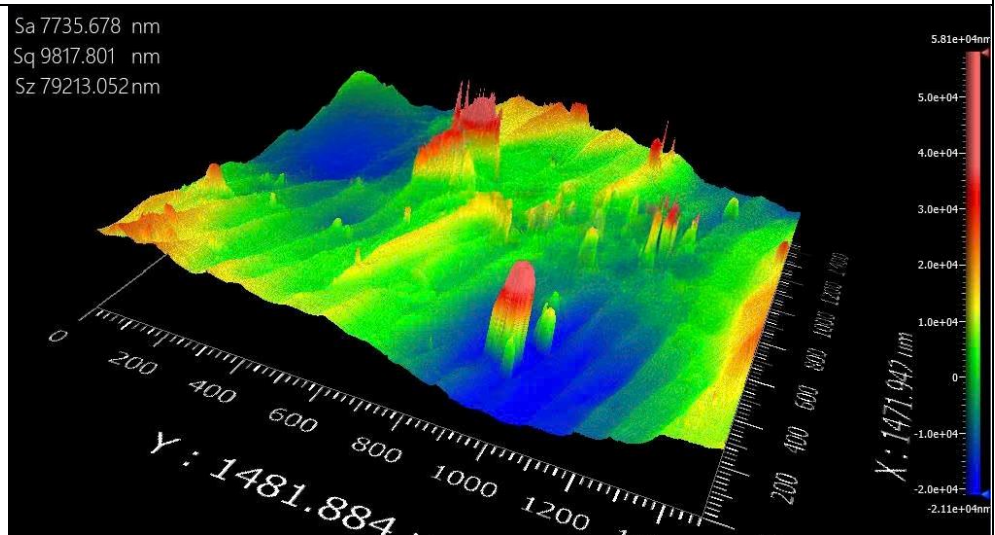
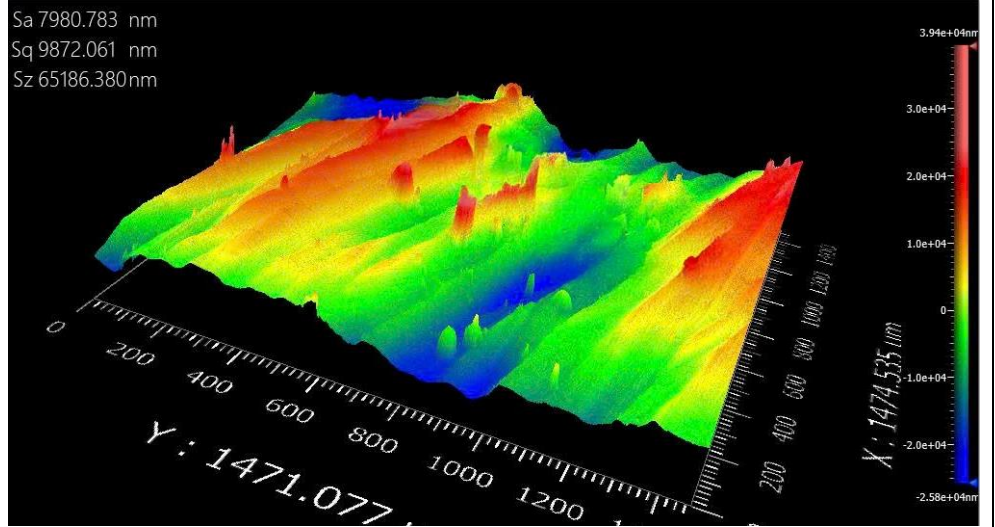
4 t=0.03  
mm  
U=350  
W  
V=150  
0 mm/s



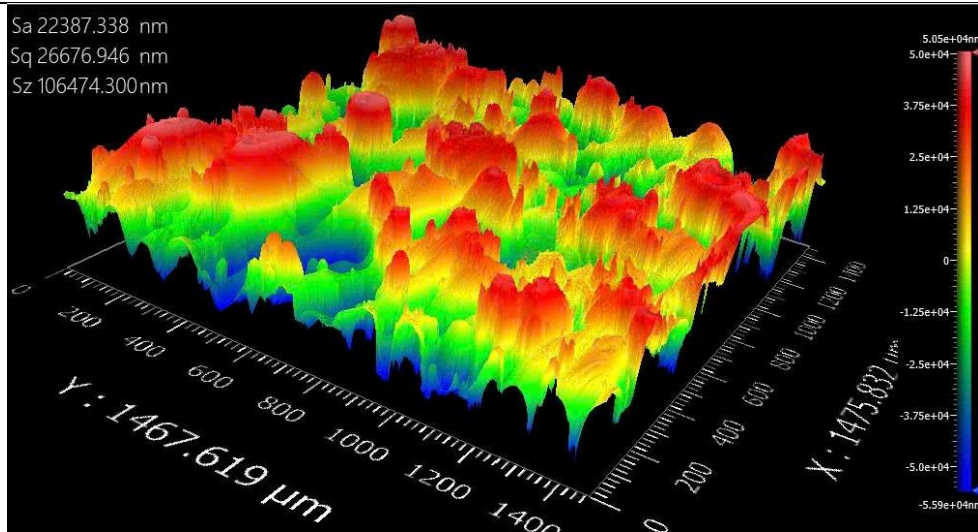
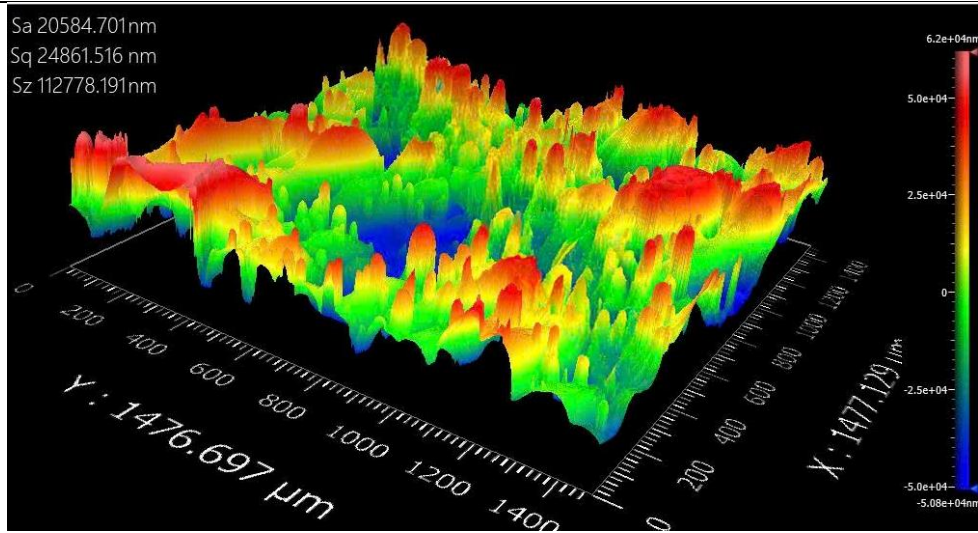
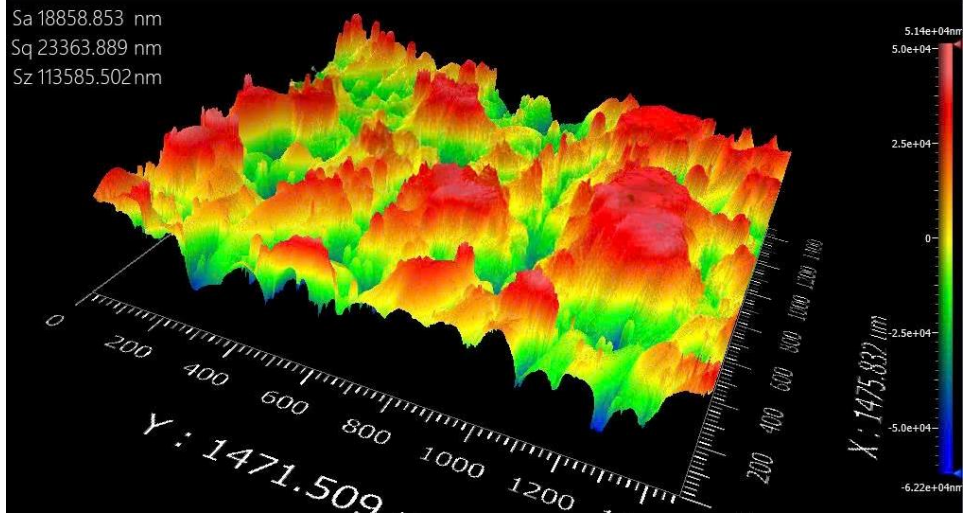
5 t=0.06  
mm  
U=150  
W  
V=400  
mm/s



6 t=0.06  
mm  
U=350  
W  
V=400  
mm/s

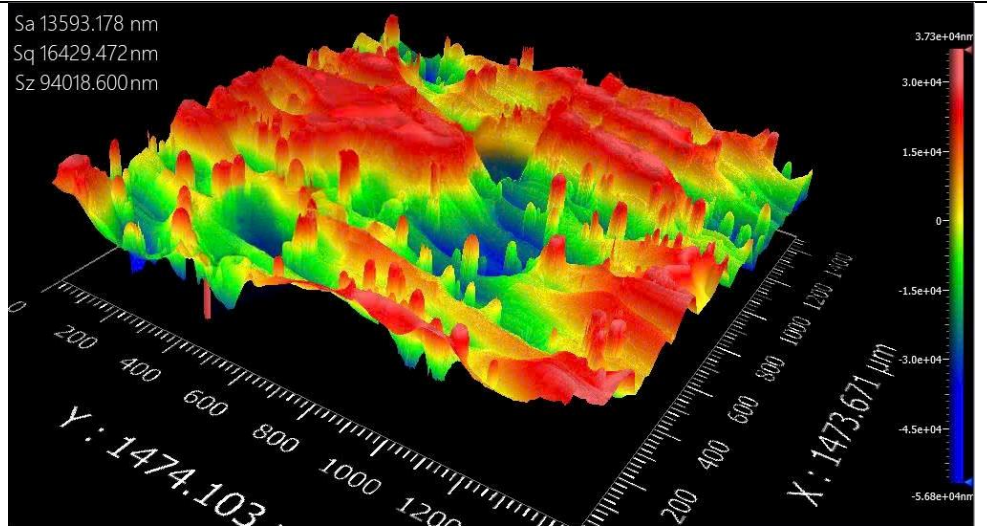
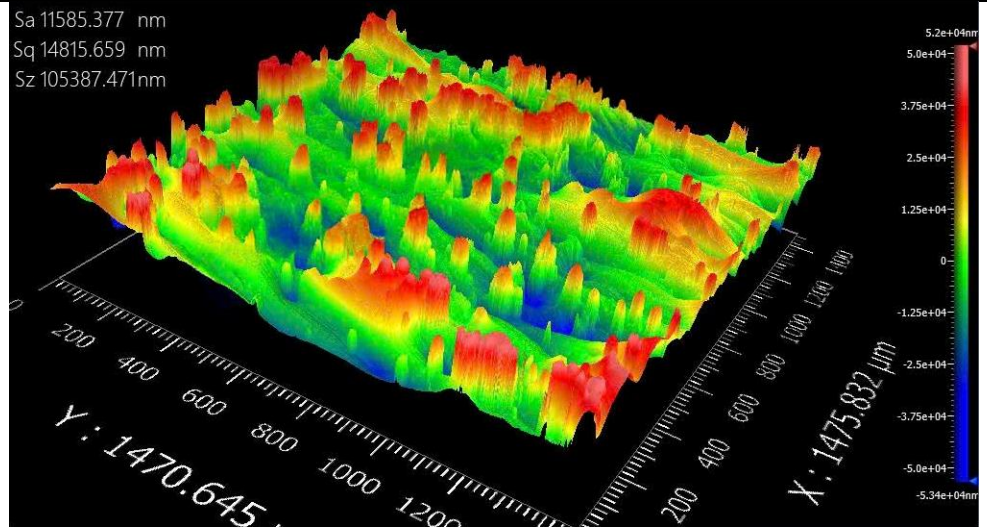
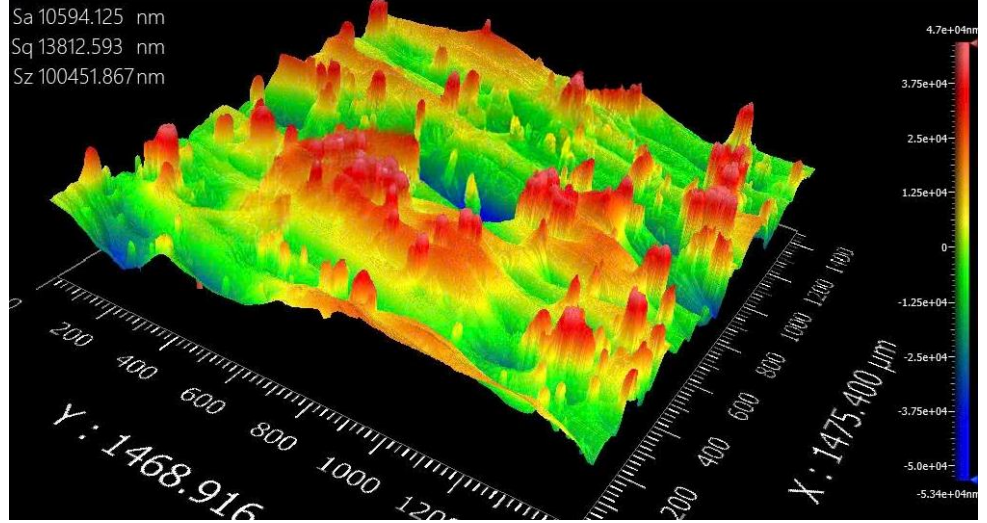


7 t=0.06  
mm  
U=150  
W  
V=150  
0 mm/

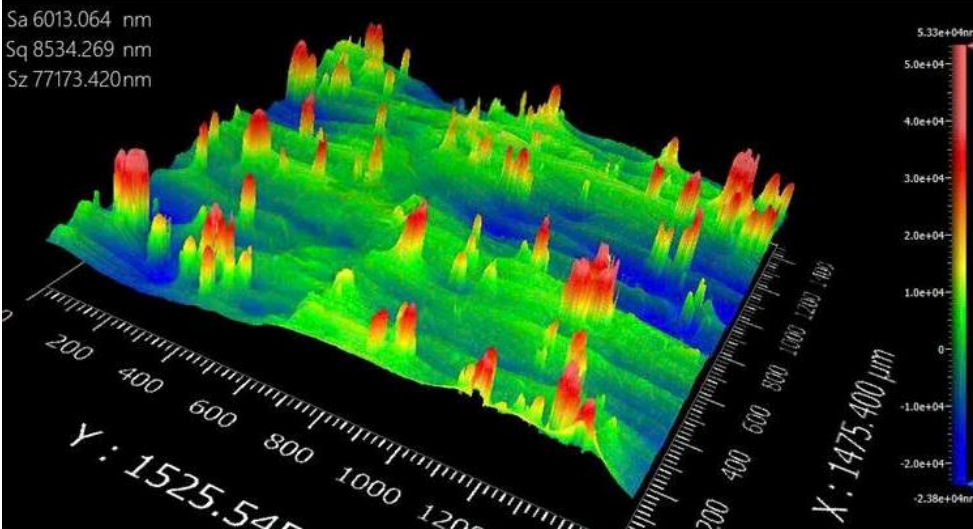
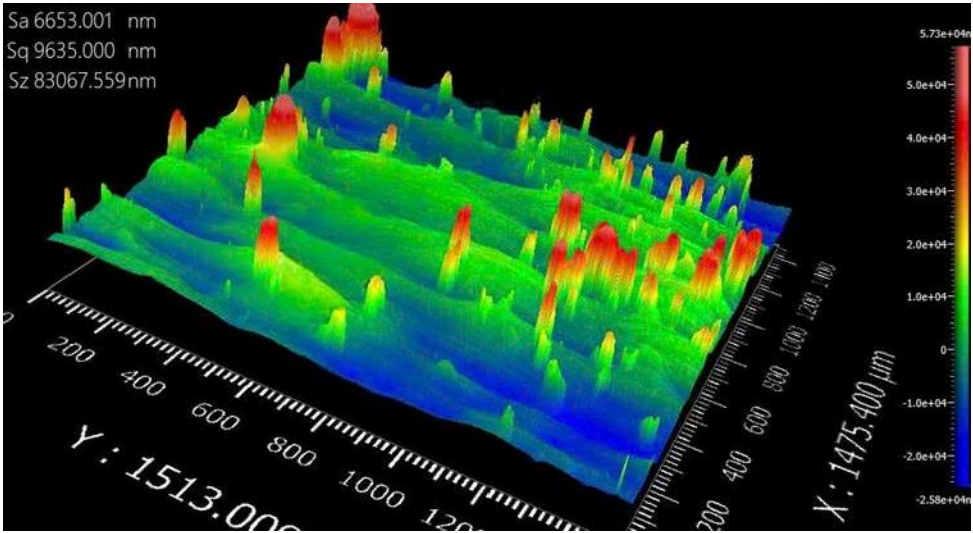
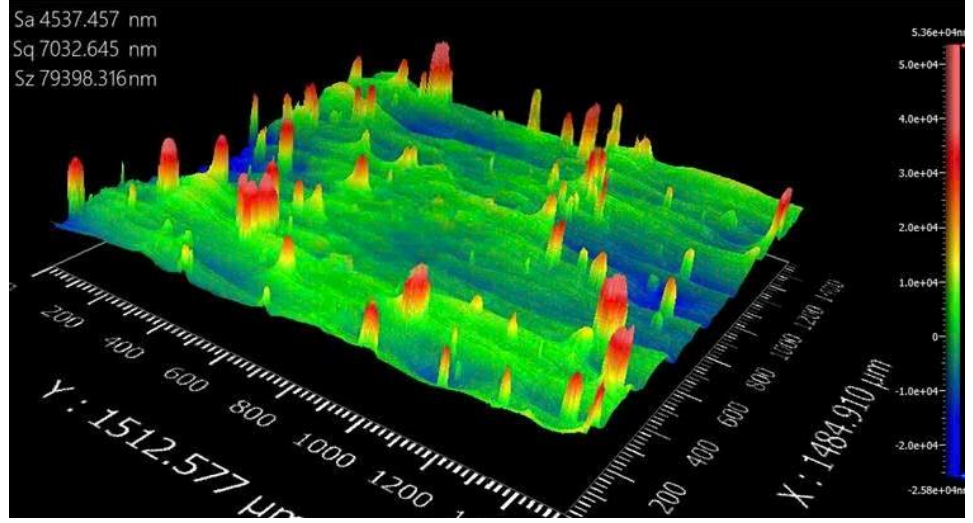


8




t=0.06  
mm  
U=350  
W  
V=150  
0 mm

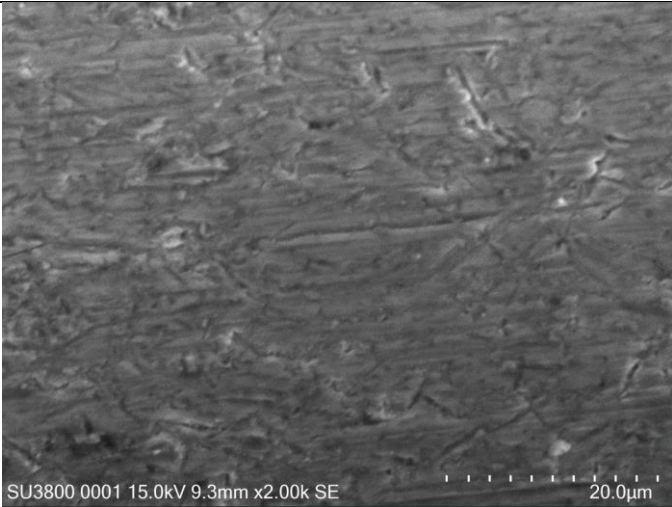




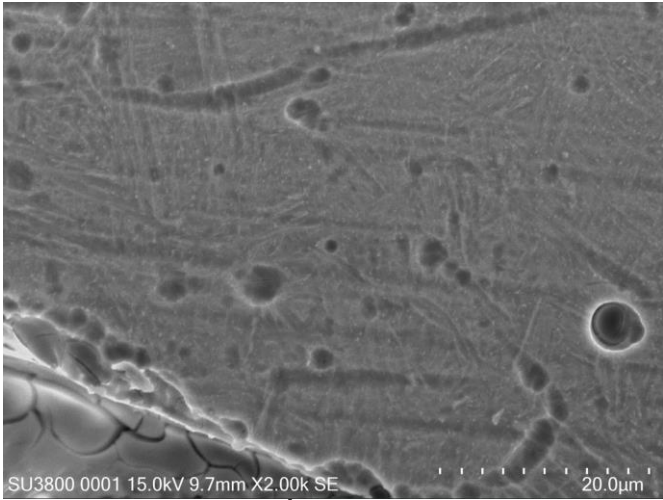


9 t=0.045  
mm  
U=250  
W  
V=950  
mm/s



*Phụ lục 2d Kết quả kiểm tra đặc điểm cấu trúc tế vi của các mẫu in*

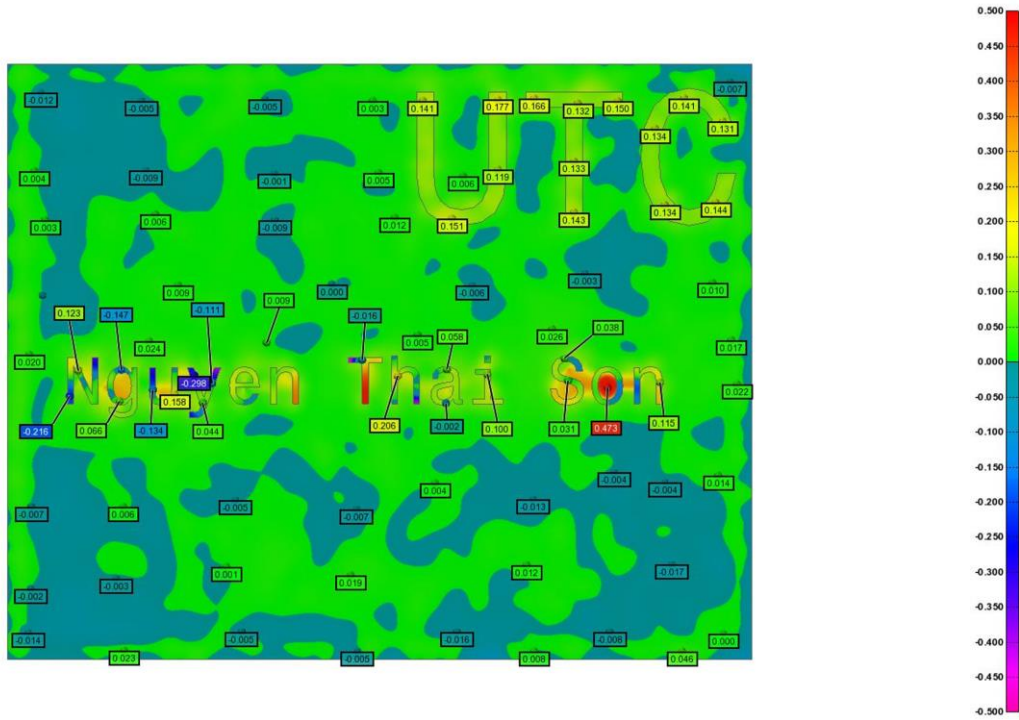
STT	Chế độ in	Mẫu in
1	t=0.03 mm U=150 W V=400 mm/s	 <p data-bbox="922 842 1145 878">Độ xốp: 7.81 %</p>
2	t=0.03 mm U=350 W V=400 mm/s	 <p data-bbox="922 1424 1145 1460">Độ xốp: 3.78 %</p>
3	t=0.03 mm U=150 W V=1500 mm/s	 <p data-bbox="922 1962 1145 1998">Độ xốp: 4.581%</p>

4	<p>t=0.03 mm  U=350 W  V=1500 mm/s</p>	 <p>Độ xốp: 7.022%</p>
5	<p>t=0.06 mm  U=150 W  V=400 mm/s</p>	 <p>Độ xốp: 7.345%</p>
6	<p>t=0.06 mm  U=350 W  V=400 mm/s</p>	 <p>Độ xốp: 5.565%</p>

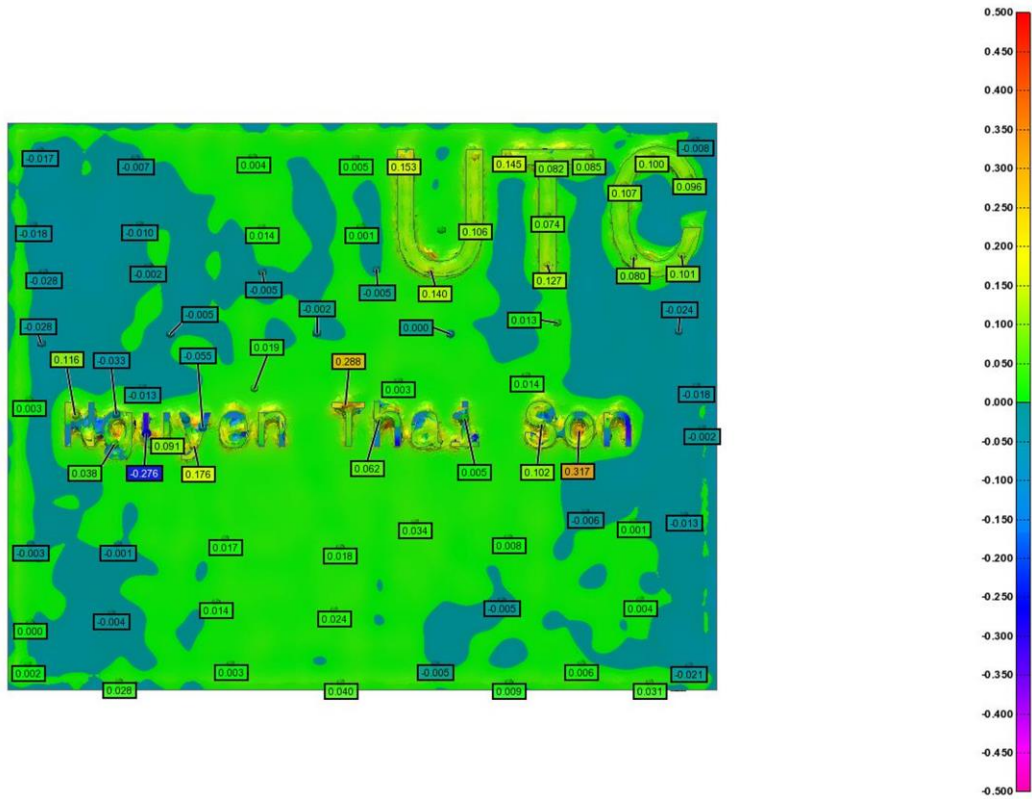
7	<p>t=0.06 mm  U=150 W  V=1500 mm/s</p>	 <p>Độ xốp: 12.375%</p>
8	<p>t=0.06 mm  U=350 W  V=1500 mm/s</p>	 <p>Độ xốp: 9.548%</p>
9	<p>t=0.045 mm  U=250 W  V=950 mm/s</p>	 <p>Độ xốp: 3.563%</p>

### PHỤ LỤC 3

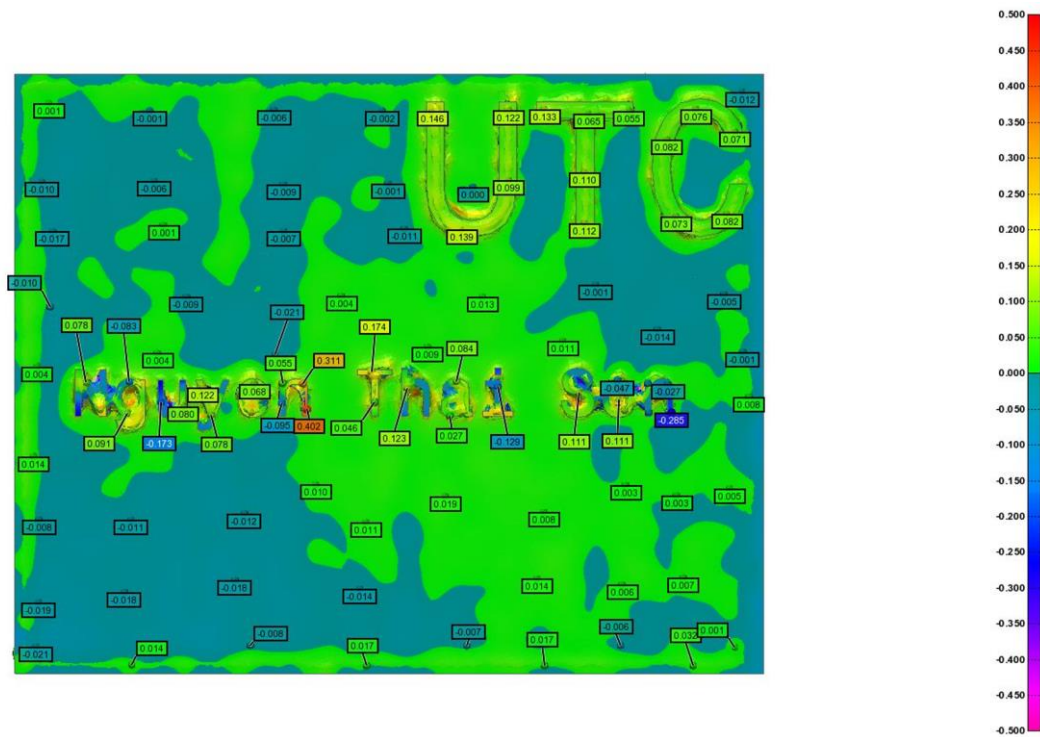
*Phụ lục 3.a. Kết quả đo độ biến dạng hình học mẫu trung tâm thứ nhất*



*Phụ lục 3.b. Kết quả đo độ biến dạng hình học mẫu trung tâm thứ hai*

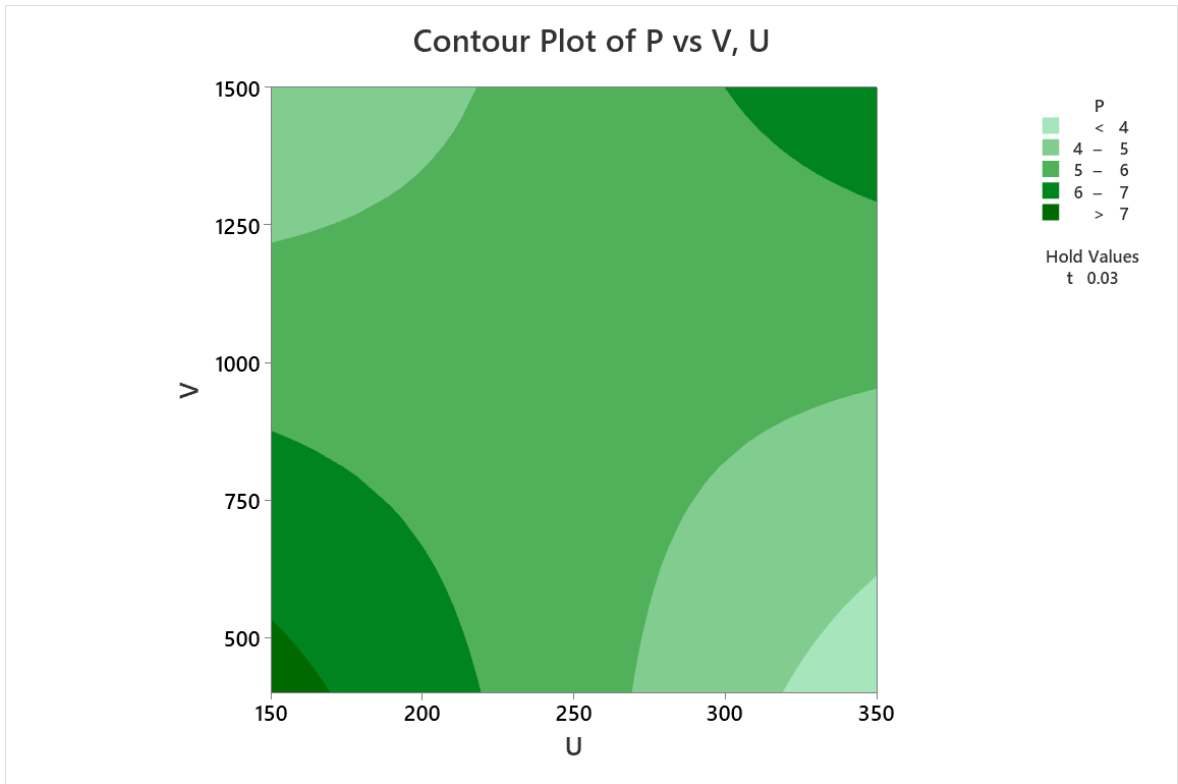


*Phụ lục 3.c. Kết quả đo độ biến dạng hình học mẫu trung tâm thứ ba*

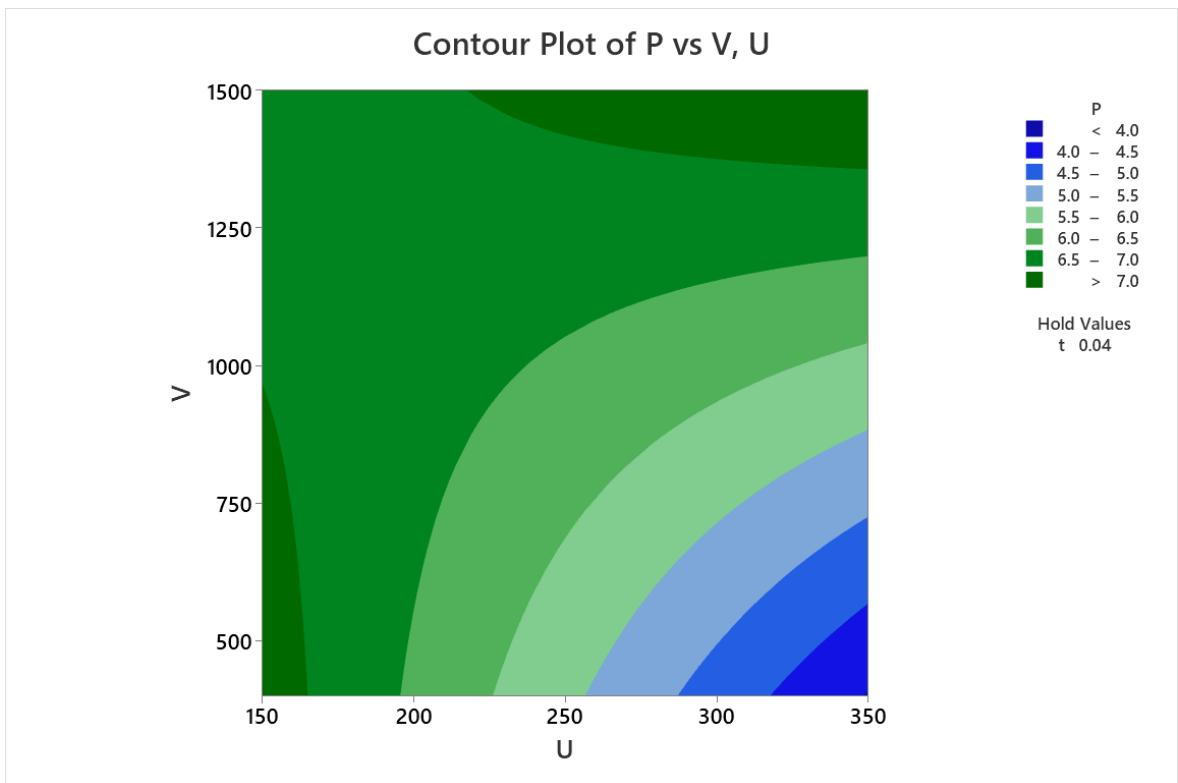


## PHỤ LỤC 4

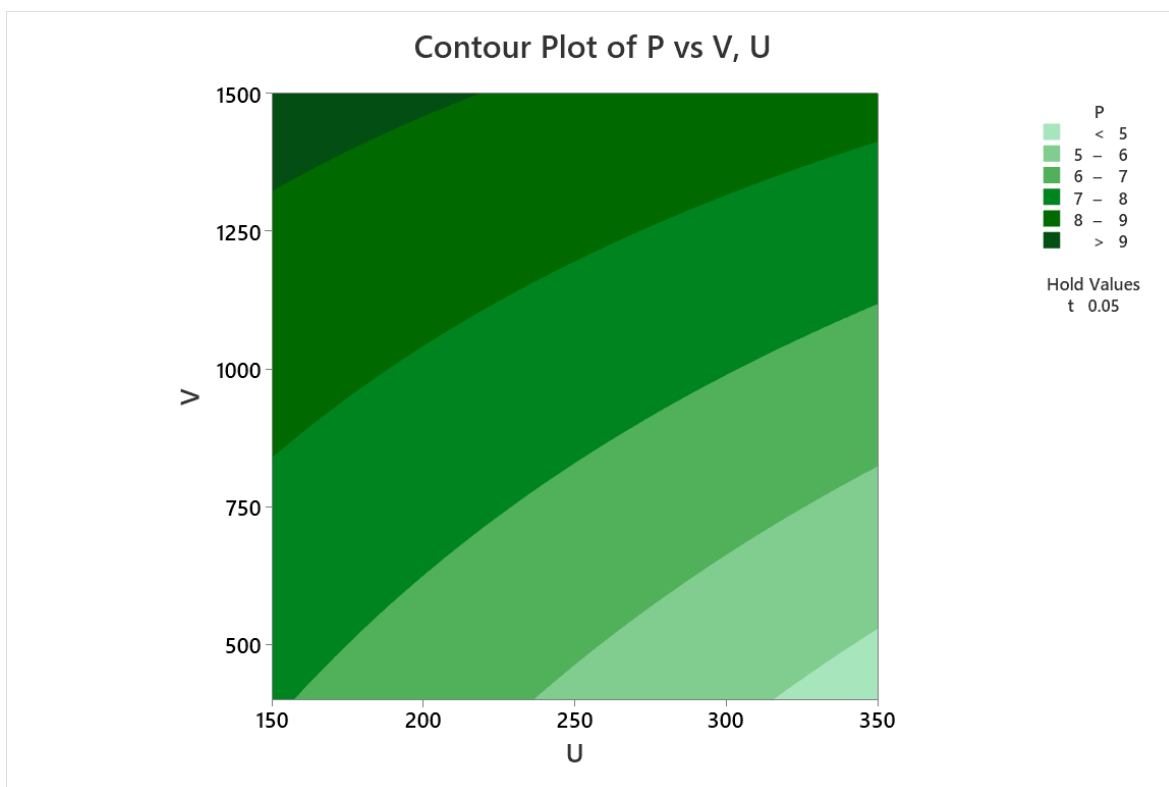
*Phụ lục 4.a. Đồ thị mối quan hệ giữa P với U, V khi  $t = 0.03$  mm*



*Phụ lục 4.b. Đồ thị mối quan hệ giữa P với U, V khi  $t = 0.04$  mm*



**Phụ lục 4.c. Đồ thị mối quan hệ giữa P với U, V khi  $t = 0.05 \text{ mm}$**



**Phụ lục 4.d. Đồ thị mối quan hệ giữa P với U, V khi  $t = 0.06 \text{ mm}$**

