

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA SẢN PHẨM GREEN PART TRONG CÔNG NGHỆ IN 3D KIM LOẠI THEO PHƯƠNG PHÁP EXTRUSION-BASED ADDITIVE

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE ACCURACY OF GREENPART PRODUCTS IN METAL 3D PRINTING USING EXTRUSION-BASED ADDITIVE MANUFACTURING

Bùi Trọng Hiếu, Trần Thị Kiều My, Huỳnh Hữu Nghị*

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

*Email: hhnghi@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Công nghệ in 3D kim loại theo phương pháp đùn vật liệu (MFE) đang ngày càng được quan tâm nhờ khả năng tạo ra chi tiết phức tạp với chi phí tối ưu. Tuy nhiên, thách thức lớn của công nghệ này là kiểm soát độ chính xác kích thước sản phẩm qua từng giai đoạn, đặc biệt là ở trạng thái Green Part. Nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng và tối ưu hóa các thông số in đến độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part để nâng cao chất lượng tổng thể. Năm thông số công nghệ được khảo sát bao gồm bề dày lớp in (LH), tốc độ in (PS), nhiệt độ in (PT), số lớp vỏ (NS) và hướng chế tạo (BO), với ba mức giá trị cho mỗi thông số. Kết quả thí nghiệm từ thiết kế FCCCD với 29 mẫu cho thấy LH và PS ảnh hưởng mạnh nhất đến sai số theo phương X và Y, trong khi phương Z bị chi phối bởi các tương tác phi tuyến như $LH \times LH$ và $PT \times NS$. Mô hình hồi quy có độ phù hợp cao với R^2 trên 87,00%. Sai số kích thước lớn nhất ghi nhận theo phương X, Y là 2,8% và phương Z là 1,2%, chủ yếu do các hiệu ứng tích lũy giữa các lớp in và tương tác thông số. Tối ưu hóa đa mục tiêu chỉ ra bộ thông số tối ưu chung cho ba phương là $LH = 0,2 \text{ mm}$, $PS = 30 \text{ mm/s}$, $PT = 210^\circ\text{C}$, $NS = 1$ và $BO = 0^\circ$. Kết quả nghiên cứu đề xuất một quy trình tối ưu hóa đáng tin cậy và làm cơ sở cho việc tiếp tục đánh giá mối liên hệ giữa Green Part và Final Part trong tương lai.

Từ khóa: MFE; Green Part; Cu/PLA; Tối ưu hóa; ANOVA.

ABSTRACT

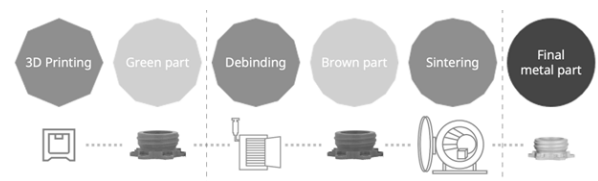
Metal 3D printing using the Material Extrusion (MFE) method is increasingly gaining attention due to its ability to fabricate complex parts at an optimized cost. However, a major challenge of this technology lies in controlling the dimensional accuracy of the product throughout each stage, especially in the Green Part state. This study aims to evaluate and optimize the effects of printing parameters on the dimensional accuracy of the Green Part to enhance overall quality. Five process parameters are investigated, including layer height (LH), print speed (PS), printing temperature (PT), number of shells (NS), and build orientation (BO), each with three

levels. Experimental results based on a Face-Centered Central Composite Design (FCCCD) with 29 runs show that LH and PS have the most significant influence on dimensional error in the X and Y directions, while the Z direction is predominantly affected by nonlinear interactions such as LH×LH and PT×NS. The regression models exhibit high goodness-of-fit with R^2 values above 87.00%. The maximum recorded dimensional errors were 2,8% in the X and Y directions, and 1,2% in the Z direction, mainly due to accumulated errors between layers and parameter interactions. Multi-objective optimization identified an optimal parameter set for all three directions: LH = 0.2 mm, PS = 30 mm/s, PT = 210°C, NS = 1, and BO = 0°. The study proposes a reliable optimization procedure and provides a foundation for further investigation into the relationship between the Green Part and Final Part in future work.

Keywords: MFE; Green Part; Cu/PLA; Optimization; ANOVA.

1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Công nghệ in 3D bằng phương pháp đùn vật liệu (Material Extrusion) – Metal Filament Extrusion (MFE) đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất và nghiên cứu khoa học nhờ khả năng chế tạo các chi tiết phức tạp với chi phí tối ưu. Trong số các vật liệu đang trong giai đoạn nghiên cứu, đồng là một trong những vật liệu dễ bắt đầu nhất [1]. Hơn thế nữa, đồng được biết đến với tính linh hoạt cao, nhờ đó vật liệu này ngày càng thu hút sự quan tâm trong cộng đồng in 3D nhờ sự kết hợp tuyệt vời giữa độ dẫn điện, nhiệt cao, độ bền cơ học tốt và khả năng chống ăn mòn. Vật liệu này hứa hẹn sẽ mang đến một cuộc cách mạng hóa về các ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp khác nhau, đặc biệt trong ba lĩnh vực chính là linh kiện điện tử, hệ thống quản lý nhiệt và hàng không vũ trụ [2]. Tuy nhiên, một trong những thách thức lớn khi sử dụng loại vật liệu nhựa pha kim loại này nói chung và vật liệu (Cu/PLA) nói riêng là khả năng kiểm soát chất lượng sản phẩm. Vòng đời sản phẩm của phương pháp MFE trải qua ba trạng thái chính: Green Part – Brown Part – Final Part tương ứng với các giai đoạn: In 3D – Loại bỏ chất kết dính – Thiêu kết trong lò.



Hình 1. Tên gọi các sản phẩm ở các giai đoạn [3]

Qua quá trình loại bỏ chất kết dính và thiêu kết, sản phẩm cuối cùng bị co rút theo mọi phương làm giảm kích thước đáng kể so với sản phẩm Green Part ban đầu [2]. Điều này chứng tỏ rằng việc kiểm soát độ chính xác kích thước sản phẩm qua từng giai đoạn là hết sức cần thiết.

Buj-Corral, I. và các cộng sự [4] đã nghiên cứu về độ chính xác kích thước và độ xấp của các bộ phận in 3D từ sợi nhựa Cu/PLA trong đó chứa khoảng 35% đồng theo khối lượng. Kết quả cho thấy, độ chính xác kích thước của các chi tiết in phụ thuộc nhiều vào chiều cao lớp và nhiệt độ in đối với phương X, Y, trong khi phương Z bị ảnh hưởng bởi tốc độ in và tương tác giữa chiều cao lớp với tốc độ in. Mahros Darsin và các cộng sự [5] tập trung vào độ chính xác kích thước, phát hiện rằng nhiệt độ vòi phun 220°C, chiều cao lớp 0,3 mm và đường điền đầy dạng đường mang lại độ chính xác kích thước tốt nhất. Ajjarapu, K. P. K. [2]

đã chỉ ra rằng sai lệch kích thước theo phương X, Y có thể lên đến 6,6% và với phương Z con số này vào khoảng 2%, nghiên cứu còn chỉ ra rằng việc sai lệch kích thước có thể ảnh hưởng đến tính lắp ghép, độ bền cơ học và các đặc tính vật lý khác của sản phẩm, làm giảm chất lượng và hiệu suất in. Do đó, việc nghiên cứu và tối ưu hóa các thông số in để nâng cao độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part là một nội dung không thể thiếu trong phương pháp MFE.

Mặc dù nhiều nghiên cứu đã xem xét ảnh hưởng của thông số in 3D đến tính chất cơ học và độ chính xác kích thước của sản phẩm Cu/PLA, nhưng mối quan hệ giữa Green Part và sản phẩm sau thiêu kết vẫn chưa được làm rõ. Hầu như chưa có nghiên cứu nào đề cập đến sự thay đổi kích thước, co ngót, biến dạng sau thiêu kết dựa trên thông số in ban đầu. Việc hiểu rõ mối liên hệ này sẽ giúp tối ưu hóa quy trình sản xuất, đảm bảo chất lượng và nâng cao ứng dụng của công nghệ in 3D kim loại MFE với vật liệu nhựa pha kim loại nói chung và vật liệu Cu/PLA nói riêng.

Nghiên cứu này sẽ giải quyết các nội dung nêu trên bằng cách xét đến 3 mức độ ảnh hưởng của 5 thông số công nghệ ảnh hưởng đến chất lượng của sản phẩm Green Part. Hơn thế nữa, mối liên hệ về độ co rút của Green Part và Final Part sẽ được làm rõ, từ đó đặt ra yêu cầu cho sản phẩm Green Part.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

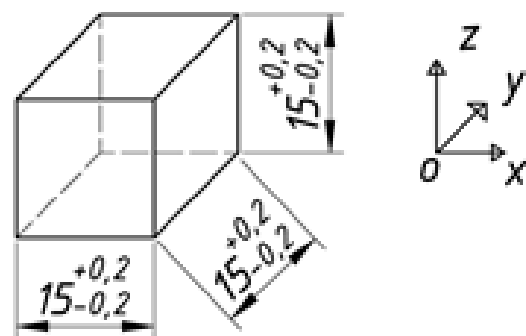
2.1. Vật liệu và lựa chọn mẫu thực nghiệm

Máy in được sử dụng trong nghiên cứu thuộc dạng máy in 3D FDM được đặt tại PTN CAD/CAM, Trường Đại học Bách Khoa,

ĐHQG – HCM. Vật liệu được sử dụng trong nghiên cứu này là sợi nhựa pha kim loại Cu/PLA (Copper Filament™) với đường kính 1,75 mm và chứa 87 ÷ 90 % khối lượng đồng. Vật liệu được nhập từ nhà cung ứng Virtual Foundry™ [1].

Dựa trên tiêu chuẩn AS/ISO/ASTM 52902:2021 [6] và các bài báo liên quan, mẫu thử dạng lập phương được chọn để tiến hành thực nghiệm. Như đã đề cập ở Mục 1, tại đây yêu cầu kỹ thuật cho sản phẩm Green Part dựa vào các đặc điểm co rút của vật liệu sẽ được đề cập. Theo hướng dẫn của The Virtual Foundry™ [1], đối với vật liệu Cu/PLA sau khi thiêu kết, kích thước co rút khoảng 7 ÷ 10%. Nghiên cứu này chọn giá trị co rút là $\delta = 10\%$. Với kích thước Final Part được chọn là $13,5 \times 13,5 \times 13,5$ mm thì mẫu thực nghiệm sẽ có kích thước $15 \times 15 \times 15$ mm (dung sai $\pm 0,2$ mm cho mỗi cạnh). Việc lựa chọn dung sai dựa trên sự kết hợp của tiêu chuẩn ISO 2768 – 1 [7] và dung sai cho phép của máy in 3D thông thường là $\pm 0,2$ mm.

Mẫu có các thông số cố định như cách điền đầy dạng đường, tỉ lệ điền đầy là 30% và đường kính vòi phun là 0,6 mm. Các mẫu được in từng mẫu một độc lập với nhau và được in cùng tại một vị trí ở chính giữa bàn.



Hình 2. Kích thước và dung sai của sản phẩm Green Part được lựa chọn

$$\text{Green Part} = \frac{\text{Final Part}}{1 - \delta} \quad (1)$$

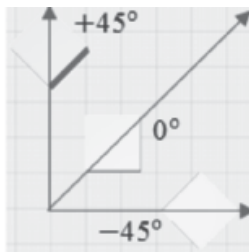
2.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp Face-Centered Central Composite Design (FCCCD) được sử dụng trong bài nghiên cứu nhằm xác định mức ảnh hưởng của các yếu tố cũng như tương tác của

chúng. Mục tiêu của nghiên cứu là xem xét 5 thông số quy trình và 3 mức độ của chúng ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part. Ta có tổng số thí nghiệm được tính toán dựa trên tài liệu [8], thu được 26 thí nghiệm chính và 3 lần lặp thí nghiệm tại tâm. Vậy tổng cộng có 29 thí nghiệm được thực hiện. Các thông số lựa chọn và các mức độ ảnh hưởng được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Các nhân tố và mức giá trị của các thông số được chọn

Nhân tố	Giải thích ý nghĩa	Ký hiệu		Mức giá trị			Khoảng thay đổi
		Tự nhiên	Mã hóa	Dưới -1	Cơ sở 0	Trên +1	
Bề dày lớp in, (mm)	Bề dày mỗi lớp in	LT	x_1	0,1	0,2	0,3	0,1
Tốc độ in, (mm/s)	Vận tốc di chuyển của đầu in	PS	x_2	20	30	40	10
Nhiệt độ in, (°C)	Nhiệt độ vùng in	PT	x_3	200	210	220	10
Số lớp vỏ, (lớp)	Số lớp tạo bên ngoài vật in	NS	x_5	1	2	3	1
Hướng chế tạo, (°)	Hướng đặt khác nhau trên bàn in	BO	x_4	-45	0	+45	45



Hướng chế tạo được lựa chọn nghiên cứu

Phần mềm cắt lớp Cura được sử dụng để tạo thành các tệp G-Code. Các mẫu được in theo hướng thẳng đứng theo chiều dương Z của máy in. Hệ trục tọa độ của phần mềm và của máy in là như nhau. Kích thước ba phương X, Y, Z của mẫu sẽ được đo lường bằng thước cặp điện tử Insize 1114-300A với độ chia nhỏ nhất là 0,01 mm. Vị trí đo trên mẫu được chọn bằng cách chọn ngẫu nhiên tập A gồm 15 mẫu trong 29 mẫu, sau đó đo kiểm tra 5 vị trí cách nhau 3

mm trên tập A. Các vị trí có tần suất xuất hiện sai lệch nhiều nhất sẽ được chọn để tiến hành áp dụng trên toàn bộ mẫu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá sai số

Nhìn chung, các thí nghiệm với bề dày lớp cao sẽ cho ra các kích thước lớn hơn, đặc biệt theo phương Z. Nguyên nhân có thể được giải thích bởi sai số tích lũy theo từng lớp in. Khi chiều cao lớp tăng, số lớp giảm dẫn đến mỗi bước di chuyển theo trục Z lớn hơn. Quá trình đùn vật liệu ở chiều cao lớp lớn thường đi kèm với khả năng nén ép giữa các lớp kém hơn, khiến vật liệu có xu hướng giãn nở theo chiều cao hoặc lan ra ngoài biên. Ngoài ra, việc giảm số lớp cũng làm tăng hiệu ứng bậc thang gây



kém chính xác biên dạng bề mặt và dẫn đến sai lệch kích thước theo cả chiều cao và phương ngang. Những yếu tố này kết hợp gây ra sai số dương so với giá trị mục tiêu. Sai số theo

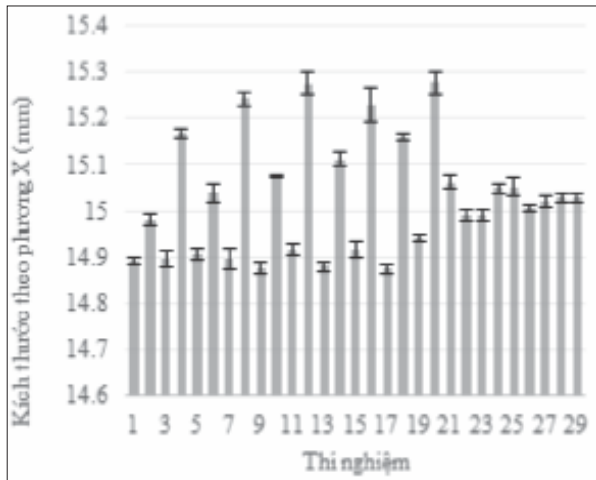
phương X sẽ được tính toán như sau (tương tự cho các phương Y và Z):

$$Edx(\%) = \left| \frac{\bar{X} - 15}{15} \right| \times 100\%$$

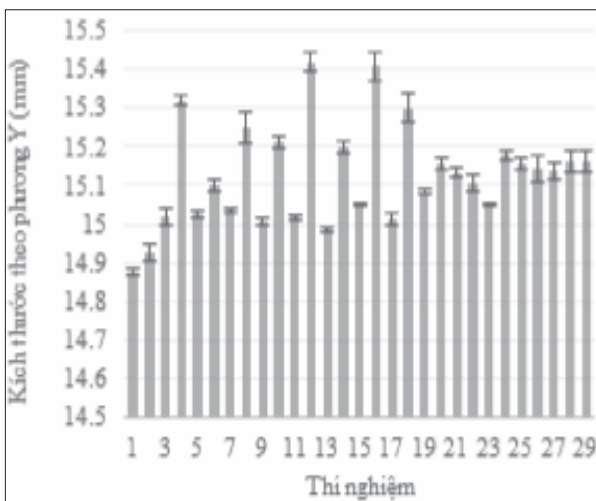
Bảng 2. Ma trận FCCCD dạng tự nhiên, kết quả đo lường giá trị trung bình và sai số X, Y, Z

STT	Bề dày lớp in (mm)	Tốc độ in (mm/s)	Nhiệt độ in (°C)	Số lớp vỏ (lớp)	Hướng chế tạo (°)	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\bar{Z}$	Edx	Edy	Edz
1	0,1	20	200	1	-45	14,89	14,88	15,10	0,73	0,83	0,67
2	0,3	20	200	1	45	14,98	14,93	15,14	0,13	0,50	0,92
3	0,1	40	200	1	45	14,90	15,02	15,14	0,69	0,13	0,92
4	0,3	40	200	1	-45	15,17	15,32	15,18	1,12	2,13	1,20
5	0,1	20	220	1	-45	14,90	15,02	15,02	0,64	0,16	0,16
6	0,3	20	220	1	45	15,04	15,10	15,14	0,25	0,67	0,96
7	0,1	40	220	1	45	14,90	15,04	15,07	0,69	0,24	0,49
8	0,3	40	220	1	-45	15,24	15,25	15,17	1,61	1,65	1,13
9	0,1	20	200	3	-45	14,88	15,01	15,02	0,83	0,05	0,16
10	0,3	20	200	3	45	15,08	15,21	15,14	0,51	1,41	0,92
11	0,1	40	200	3	45	14,92	15,02	14,99	0,56	0,11	0,09
12	0,3	40	200	3	-45	15,28	15,42	15,17	1,84	2,80	1,11
13	0,1	20	220	3	-45	14,88	14,99	15,09	0,80	0,09	0,61
14	0,3	20	220	3	45	15,11	15,20	15,10	0,75	1,32	0,64
15	0,1	40	220	3	45	14,92	15,05	15,10	0,56	0,33	0,68
16	0,3	40	220	3	-45	15,23	15,41	15,14	1,53	2,72	0,95
17	0,1	30	210	2	0	14,87	15,01	15,06	0,84	0,09	0,37
18	0,3	30	210	2	0	15,16	15,30	15,08	1,05	2,01	0,56
19	0,2	20	210	2	0	14,94	15,08	14,96	0,39	0,56	0,29
20	0,2	40	210	2	0	15,28	15,16	14,98	1,85	1,04	0,12
21	0,2	30	200	2	0	15,06	15,13	15,06	0,41	0,88	0,37
22	0,2	30	220	2	0	14,99	15,11	15,02	0,05	0,71	0,13
23	0,2	30	210	1	0	14,99	15,05	15,01	0,07	0,33	0,07
24	0,2	30	210	3	0	15,05	15,18	15,02	0,32	1,19	0,11
25	0,2	30	210	2	-45	15,05	15,16	15,06	0,35	1,04	0,37
26	0,2	30	210	2	45	15,01	15,15	15,00	0,04	0,97	0,01
27	0,2	30	210	2	0	15,02	15,14	15,04	0,13	0,92	0,28
28	0,2	30	210	2	0	15,03	15,16	15,04	0,19	1,07	0,29
29	0,2	30	210	2	0	15,03	15,16	15,04	0,19	1,07	0,29

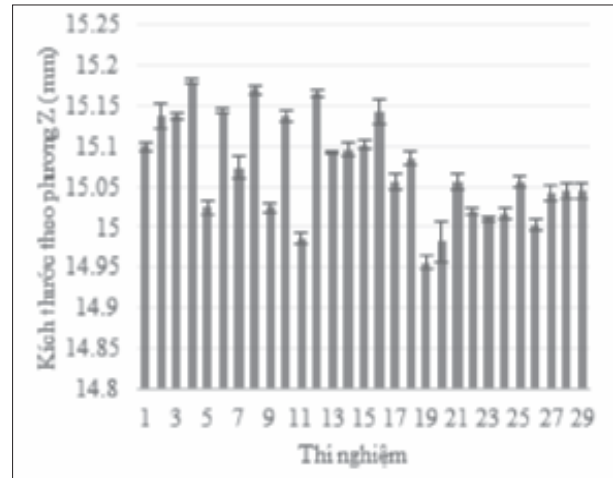
Dựa trên các số liệu thu được trên Hình 3, ta thấy hầu hết các giá trị $\bar{Y}$ luôn lớn hơn $\bar{X}$ trong các trường hợp. Trong khi, trên lý thuyết hai phương này thường được xem là đẳng hướng do nằm trên cùng mặt phẳng và được điều khiển bởi hệ truyền động tương đương. Nguyên nhân có thể đến từ các yếu tố như độ căng đai không đều, hiệu chuẩn và cách hoạt động đường in của đầu in không đồng nhất theo từng phương. Ngoài ra, hiện tượng đùn dư và lan rộng vật liệu tại biên cũng có thể xảy ra làm gia tăng sai lệch dị hướng giữa chúng.



(a)



(b)



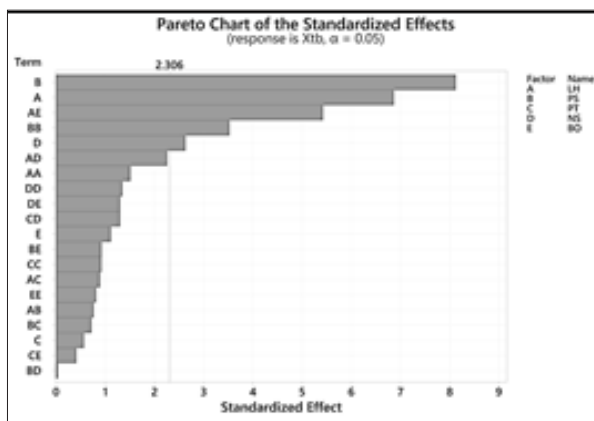
(c)

Hình 3. Kích thước trung bình (a) Trục X, (b) Trục Y, (c) Trục Z với thanh lỗi tương ứng là $\pm$ Độ lệch chuẩn của phép đo từng mẫu

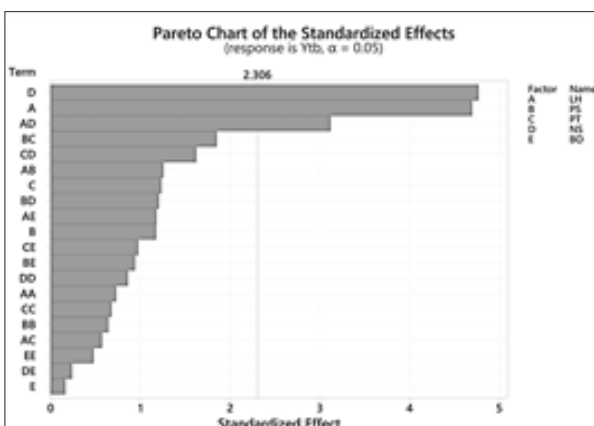
Sai số nhỏ nhất theo các phương được ghi nhận tại các mẫu 22, 23, 26 (Edx), mẫu 9, 13, 17 (Edy) và mẫu 23, 26 (Edz), trong đó bề dày lớp in 0,2 mm, tốc độ in 30 mm/s và nhiệt độ 210°C tỏ ra ưu việt hơn. Mẫu 23 đạt sai số trung bình nhỏ nhất với bộ thông số: LH = 0,2 mm; PS = 30 mm/s; PT = 210°C; NS = 1; BO = 0°. Ngược lại, sai số lớn nhất xuất hiện ở các mẫu có tốc độ in cao (40 mm/s), bề dày lớp in lớn (0,3 mm) và số lớp vỏ nhiều (3 lớp), cho thấy bề dày lớp và tốc độ in là hai yếu tố ảnh hưởng mạnh đến sai số theo cả ba phương. Sai số lớn nhất theo phương X, Y lên đến 2,8% và theo phương Z là 1,2%. Tuy nhiên, sai số Edx/Edy và Edz đôi khi thể hiện hành vi ngược nhau. Ở các thí nghiệm 2, 3, 6 và 15, mặc dù Edx/Edy thấp, nhưng lại thu được giá trị Edz khá cao. Điều này cho thấy sự phụ thuộc của độ chính xác kích thước không chỉ riêng lẻ vào các đại lượng mà có thể có sự phụ thuộc vào tương tác giữa chúng. Do đó, nghiên cứu này đã tiến hành tối ưu đa mục tiêu và trình bày chi tiết trong Mục 3.3.



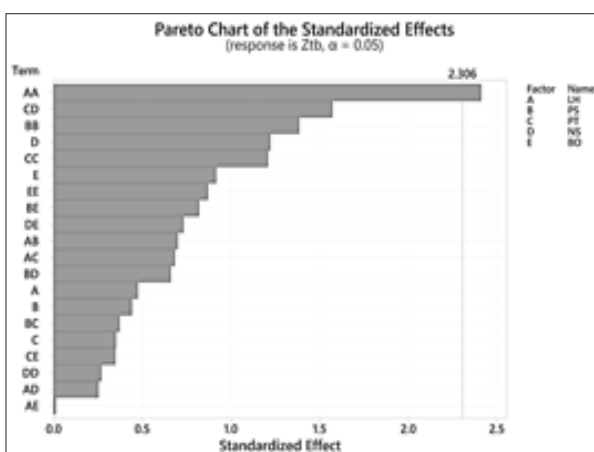
3.2. Mô hình hồi quy



(a)



(b)

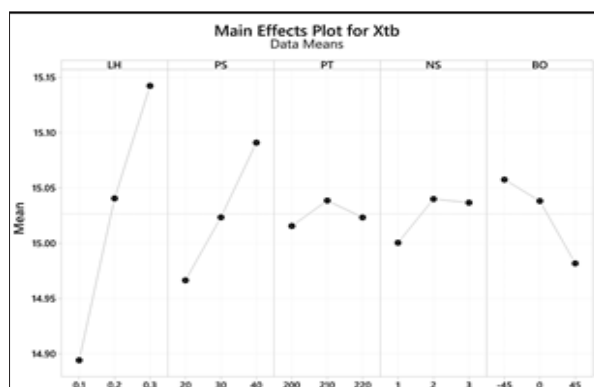


(c)

Hình 4. Biểu đồ Pareto giá trị trung bình theo (a) Phương X, (b) Phương Y, (c) Phương Z

Từ dữ liệu trong Bảng 2 xây dựng mô hình hồi quy bằng phần mềm Minitab thu được đồ thị Pareto thể hiện trên Hình 4, Đồ thị hiệu ứng chính và Đồ thị tương tác giữa các biến trên Hình 5.

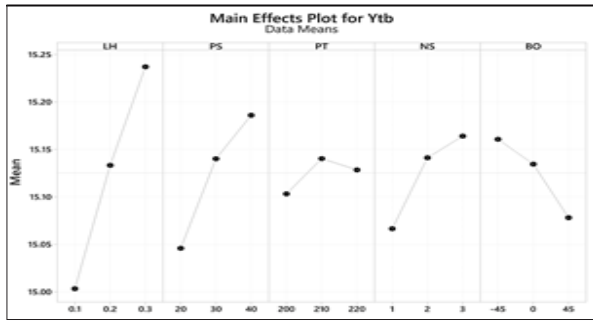
Biểu đồ Pareto cho thấy tốc độ in là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất theo phương X, tiếp đó là bề dày lớp in. Bên cạnh đó, PS×PS thể hiện ảnh hưởng phi tuyến của tốc độ in và các tương tác như LH×BO, LH×NS cho thấy chúng cần được điều chỉnh đồng thời. Đối với phương Y, số lớp vỏ là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất, tiếp đến là bề dày lớp in và tương tác LH×NS. Ngoài ra, tương tác PS×PT và PT×NS cũng có ảnh hưởng do liên quan đến khả năng lấp đầy vật liệu. Mặc khác, các yếu tố ảnh hưởng tới phương Z là các yếu tố phi tuyến như LH×LH và các tương tác như PT×NS.



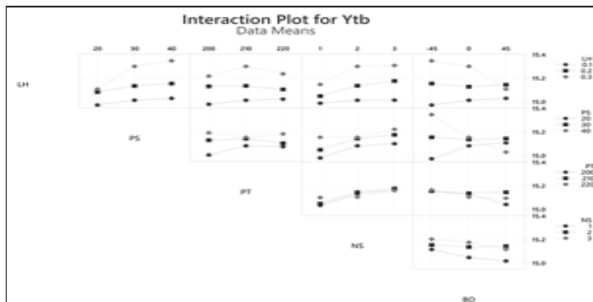
(a)



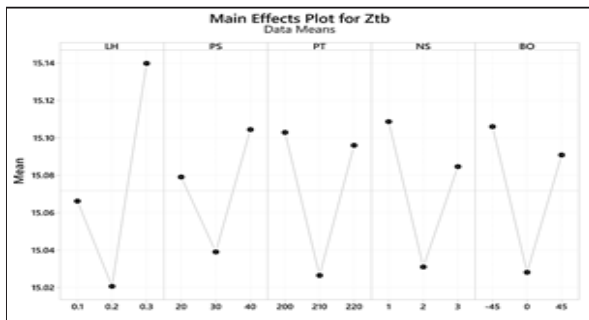
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Hình 5. Biểu đồ hiệu ứng chính và biểu đồ tương tác giữa các biến: (a) (b) Phương X, (c) (d) Phương Y và (e) (f) Phương Z

Biểu đồ hiệu ứng chính cho thấy kích thước $\bar{X}$ tăng mạnh với xu hướng gần như tuyến tính với bề dày lớp in thay đổi từ 0,1 đến 0,3 mm. Tốc độ in cũng góp phần làm tăng kích thước, đặc biệt tại 40 mm/s. Tuy nhiên, hướng chế tạo có biểu hiện trái ngược khi làm $\bar{X}$ giảm dần. Trong các tương tác thì LH×BO thể hiện tương tác mạnh nhất khi các đường đáp ứng cắt nhau rõ rệt, cho thấy ảnh hưởng của bề dày lớp lên $\bar{X}$ phụ thuộc lớn vào hướng chế tạo.

Bên cạnh đó, giá trị $\bar{Y}$ thể hiện cùng xu hướng với $\bar{X}$. Các thông số bề dày lớp in, tốc độ in và số lớp vỏ; ảnh hưởng từ cao đến thấp; đều có quan hệ đồng biến với $\bar{Y}$. Về tương tác các cặp LH×NS và LH×PS có ảnh hưởng mạnh nhất với dạng phân kỳ rõ rệt, cho thấy tác động của bề dày lớp in được tăng cường khi kết hợp với số lớp vỏ hoặc tốc độ in. Cặp LH×BO và PS×BO có sự đảo chiều nói lên ảnh hưởng của bề dày lớp in, tốc độ in lên $\bar{Y}$ có phụ thuộc vào hướng chế tạo.

Giá trị $\bar{Z}$ có xu hướng ảnh hưởng phi tuyến bởi các thông số với cực trị tại mọi mức giá trị trung bình, trong đó bề dày lớp in là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất. Biên độ biến thiên của $\bar{Z}$ nhỏ nhất trong ba phương (quanh 15,00-15,10), hầu hết các cặp tương tác đều không có ý nghĩa ngoại trừ LH×PS và LH×PT. Cặp LH×PS thể hiện tương tác rõ nhất khi $\bar{Z}$ đạt cực tiểu nhưng mức giảm phụ thuộc vào PS. Cặp LH×PT cũng có ảnh hưởng nhất định, dù biên độ nhỏ hơn.



Bảng 3. Kết quả mô hình hồi quy theo các phương X, Y, Z

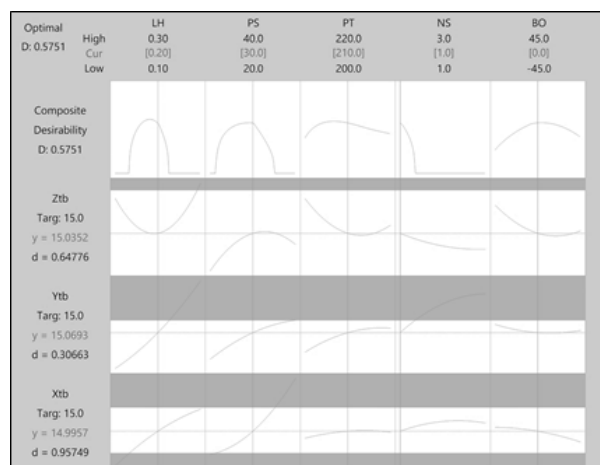
Đáp ứng	R ² (%)	R ² (adj) (%)	Biến tác động mạnh nhất
$\bar{X}$	98,42	94,49	PS LH LH×BO
$\bar{Y}$	96,83	88,90	NS LH LH×NS
$\bar{Z}$	87,06	54,70	LH×LH PT×NS PS×PS

3.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu

Bảng 4. Bộ thông số tối ưu cho từng mục tiêu

Mục tiêu	LH	PS mm/s	PT °C	NS lớp	BO (°)	Composite Desirability
$\bar{X}$	0,2	31	200	2	45	1
$\bar{Y}$	0,2	28,5	200	1	45	1
$\bar{Z}$	0,1	20	207	3	45	0,974
$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$	0,2	30	210	1	0	0,571

Sai lệch gây ra theo phương X, Y có liên quan mật thiết đến bề dày lớp in, tốc độ in và số lớp vỏ. Tuy nhiên theo phương Z, yếu tố ảnh hưởng sâu sắc lại là các biến tương tác. Vì vậy, bài toán tối ưu được đặt ra nhằm tìm giá trị mục tiêu $15 \pm 0,1$ mm cho mỗi cạnh. Bên cạnh đó, mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu được thiết lập để tìm ra bộ thông số tối ưu chung cho cả ba phương X, Y, Z. Bộ thông số tối ưu chung cho cả ba phương X, Y, Z được quan sát tại các mức giá trị trung bình với bề dày lớp in 0,2 mm, tốc độ in 30 mm/s, nhiệt độ in 210°C, số lớp vỏ là 1 cùng với hướng in tại 0°.



Hình 6. Kết quả tối ưu cho cả ba phương X, Y, Z

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu hiện tại chỉ ra rằng, độ chính xác kích thước của sản phẩm Green Part

của công nghệ in 3D kim loại bằng sợi vật liệu Cu/PLA phụ thuộc nhiều vào các yếu tố công nghệ. Các kết luận chính của bài nghiên cứu này có thể kể đến bao gồm:

- Sai số kích thước lớn nhất theo phương X, Y lên tới 2,8% phụ thuộc vào dày lớp in, tốc độ in và số lớp vỏ;

- Sai số lớn nhất theo phương Z với giá trị nhỏ hơn rơi vào khoảng 1,2% chủ yếu phụ thuộc vào độ phi tuyến LH×LH và tương tác của cặp thông số PT×NS;

- Bộ thông số tối ưu được tìm ra cho cả từng phương và tổng hợp ba phương X, Y, Z. Bộ thông số tối ưu được tìm ra là bề dày lớp in 0,2 mm, tốc độ in 30 mm/s, nhiệt độ in 210°C, số lớp vỏ là 1 cùng với hướng in tại 0°.

Nghiên cứu này đề xuất bộ thông số tối ưu cũng như một phương pháp thực nghiệm cho loại vật liệu Cu/PLA nói riêng và vật liệu nhựa pha kim loại nói chung trong công nghệ MFE. Tuy nhiên, việc nghiên cứu tiếp tục ở giai đoạn Final Part là hết sức cần thiết để xác nhận lại độ co rút và đánh giá sâu thêm về tầm quan trọng của việc kiểm soát chất lượng Green Part đến chất lượng sản phẩm sau cùng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (HCMUT – VNU-HCM) theo mã số đề tài SVKSTN-2024-CK-49. Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ thực hiện nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 02/5/2025

Ngày phản biện: 21/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. The Virtual Foundry <https://thevirtualfoundry.com/print/>
- [2]. Ajjarapu, K. P. K. (2023), “Synergistic strategies in sinter-based material extrusion (MEX) 3D printing of copper: Process development, product design, predictive maps and models”. <https://doi.org/10.18297/etd/4197>
- [3]. BCN3D Technologies (2022), “Get to know the 3D printer metal filament options in your Metal Pack”. Truy vấn ngày 26/02/2025, <https://www.bcn3d.com/get-to-know-the-3d-printer-metal-filament-options-in-your-metal-pack/>
- [4]. Buj-Corral, I.; Sivatte-Adroer, M., “An Experimental Investigation about the Dimensional Accuracy and the Porosity of Copper-Filled PLA Fused Filament Fabrication Parts”. *Metals* 2023, 13, 1608. <https://doi.org/10.3390/met13091608>
- [5]. Mahros Darsin, H.S, M.E.R, Y.H, M.A.C (2022), “The Effect of Nozzle Temperature, Layer Height, and Infill Pattern on Dimensional Accuracy and Flexural Strength of 3D Printed Cu-PLA Filaments”. *Gongcheng AES*, Vol.54, No.3, pp. 1437-1449. ResearchGate Link.
- [6]. International Organization for Standardization, ASTM International & Standards Australia (2021), AS/ISO/ASTM 52902:2021 – Additive manufacturing – Test artifacts – Geometric capability assessment of Additive manufacturing systems.
- [7]. International Organization for Standardization (1993), ISO 2768-1: General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications.
- [8]. Nguyễn Hữu Lộc (2021), “Quy hoạch và phân tích thực nghiệm”. NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.