

NGHIÊN CỨU BỘ THÔNG SỐ TỐI ƯU CÔNG NGHỆ IN 3D FDM ĐỂ CẢI TIẾN ĐỘ BỀN KÉO NHỰA PETG

PHẠM HỮU LỘC

Khoa Công nghệ cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: phamhuuloc@iuh.edu.vn

DOIs: <https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v80i2.5903>

Tóm tắt. Trong bối cảnh công nghệ in 3D ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất nhanh, chế tạo mẫu và các linh kiện kỹ thuật, việc tối ưu hóa cơ tính của vật liệu in là yếu tố quan trọng để mở rộng phạm vi ứng dụng thực tiễn. Nghiên cứu này tập trung cải thiện độ bền kéo của nhựa PETG - một vật liệu phổ biến trong công nghệ in 3D FDM (Fused Deposition Modelling) nhờ đặc tính cơ học tốt và khả năng gia công thuận lợi. Các thông số in ảnh hưởng đến độ bền kéo được khảo sát và tối ưu bằng phương pháp thực nghiệm Taguchi. Dựa trên tỷ số tín hiệu-nhiều (S/N) lớn nhất, bộ thông số in FDM tối ưu được xác định gồm: chiều cao lớp in 0,1 mm, tốc độ in 60 mm/s, mật độ điền đầy 40%, và kích thước vòi phun 1,2 mm. Khi áp dụng các thông số tối ưu này, mẫu thử PETG đạt độ bền kéo 11,62 N/mm². Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và thực nghiệm giúp nâng cao chất lượng sản phẩm in 3D từ nhựa PETG, đồng thời hỗ trợ quá trình lựa chọn thông số in phù hợp trong các ứng dụng yêu cầu độ bền cơ học cao.

Từ khóa. Nhựa PETG, Taguchi, in 3D FDM, tối ưu, tỉ số S/N.

1. GIỚI THIỆU

Nhựa PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) là một loại nhựa nhiệt dẻo thuộc nhóm polyester, được tạo ra từ PET (Polyethylene Terephthalate) bằng cách thêm glycol vào quá trình sản xuất. Sự bổ sung glycol giúp PETG có độ bền cơ học cao hơn, khả năng chịu lực tốt hơn và dễ gia công hơn so với PET. Hiện nay, PETG được sử dụng rộng rãi trong in 3D, đặc biệt dưới dạng sợi nhựa cho các máy in FDM [1].

Công nghệ in 3D, hay còn gọi là công nghệ bồi đắp vật liệu (AM – Additive Manufacturing), là phương pháp chế tạo sản phẩm bằng cách đắp từng lớp vật liệu dựa trên mô hình CAD (Computer Aided Design). Công nghệ này cho phép tạo ra sản phẩm trong thời gian ngắn, chi phí thấp và linh hoạt về hình dạng so với các phương pháp gia công truyền thống [2]. Do đó, chất lượng cơ học của sản phẩm in 3D ngày càng được quan tâm, đặc biệt khi công nghệ này dần được ứng dụng trong sản xuất các chi tiết chịu tải.

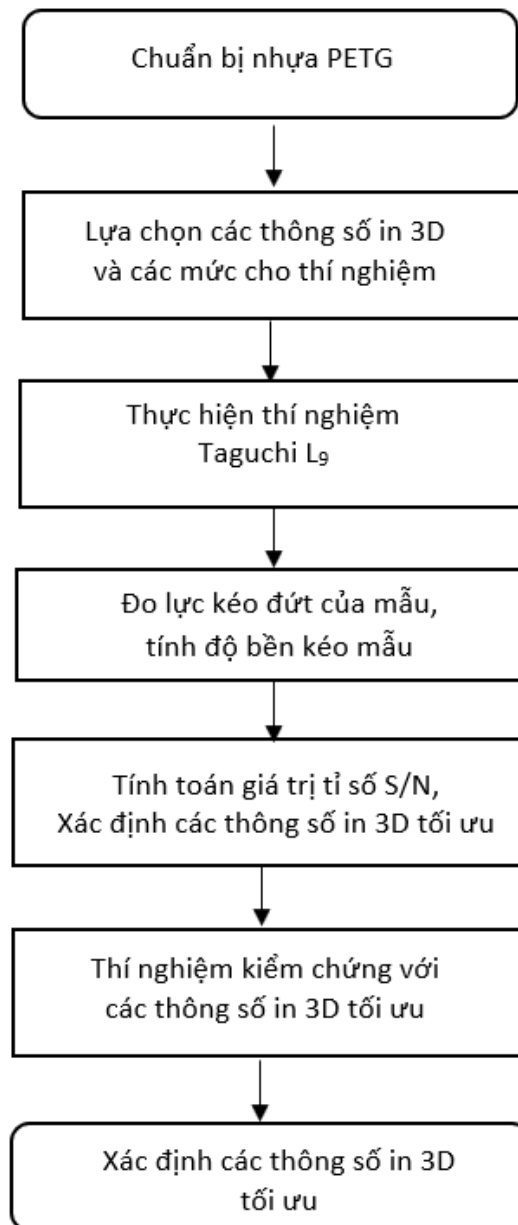
Đối với các chi tiết nhựa in 3D, độ bền kéo là một trong những thông số quan trọng phản ánh trực tiếp khả năng chịu lực của sản phẩm. Độ bền này phụ thuộc vào nhiều yếu tố như chất lượng vòi phun, nhiệt độ in, độ ẩm, vật liệu nhựa và cấu trúc thiết kế [3]. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về tối ưu hóa thông số in 3D, nhưng các phân tích tập trung riêng trên vật liệu PETG vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, việc xác định bộ thông số in FDM tối ưu nhằm nâng cao độ bền kéo cho PETG vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Khoảng trống này đặt ra nhu cầu cần thiết phải thực hiện các thí nghiệm có hệ thống nhằm nhận dạng các thông số ảnh hưởng và tìm ra giá trị tối ưu.

Bài báo này tập trung nghiên cứu bộ thông số in 3D FDM tối ưu để cải thiện độ bền kéo của sản phẩm nhựa PETG. Phương pháp Taguchi được áp dụng để đánh giá ảnh hưởng của các thông số in 3D đối với vật liệu PETG. Các thông số khảo sát gồm: chiều cao lớp in, tốc độ in, mật độ điền đầy và kích thước vòi phun. Sau khi thực hiện các thí nghiệm Taguchi, bộ thông số tối ưu được xác định dựa trên kết quả tỉ số S/N. Hình 1 mô tả quy trình nhận dạng các thông số in 3D tối ưu.

2. NỘI DUNG THÍ NGHIỆM

2.1 Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu in 3D FDM là các vật liệu nhựa dạng sợi. Sợi nhựa nguyên chất không pha lẫn và đường kính sợi nhựa có 2 kích thước 1,75mm và 3mm, dung sai thường $\pm 0,05$ mm. Trong nghiên cứu này, vật liệu thí nghiệm được chọn là nhựa PETG (Hình 2). Các mẫu thí nghiệm in 3D FDM được tiến hành đo lực kéo đứt nhựa trên máy đo lực kéo đứt nhựa theo tiêu chuẩn ASTM D638 (Hình 3).



Hình 1. Quy trình thực nghiệm Taguchi để xác định các thông số in 3D tối ưu.



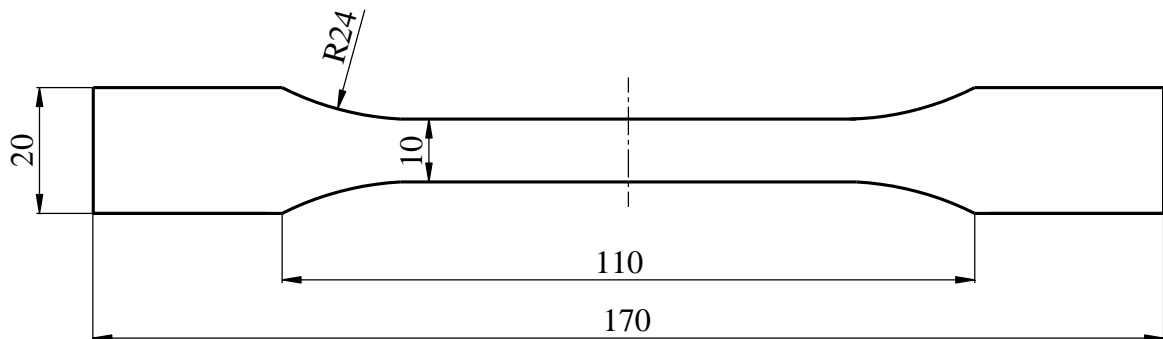
Hình 2: Vật liệu thí nghiệm nhựa PETG.



Hình 3: Máy đo lực kéo đứt nhựa.

2.2. Thông số mẫu thí nghiệm

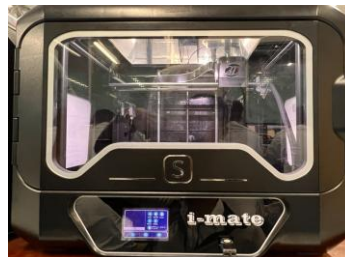
Chọn mẫu thí nghiệm theo tiêu chuẩn mẫu A1 ISO 3167, kích thước mẫu thử theo tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9853:2013, bề dày mẫu thử là 4mm có kích thước cụ thể như sau (Hình 4):



Hình 4: Thông số kích thước mẫu thí nghiệm PETG.

2.3. Chế tạo mẫu thí nghiệm

Có rất nhiều phần mềm sử dụng để điều khiển máy in 3D như Prusa slicer, Firmware, 3D Printer Control, Cura... Trong bài báo này, phần mềm Cura được sử dụng để cài đặt và điều chỉnh thông số in [4]. Các mẫu thí nghiệm được in trên máy in 3D i-mate (Hình 5).



Hình 5: Máy in 3D FDM hiệu i-mate

2.4. Số mẫu thực nghiệm

Độ bền kéo là một trong những nhân tố để đánh giá chất lượng của vật liệu nhựa. Các thông số in 3D FDM ảnh hưởng đến độ bền kéo vật liệu nhựa được xác định dựa vào thí nghiệm ma trận Taguchi [5, 6]. Công nghệ in 3D FDM, các thông số quan trọng ảnh hưởng đến độ bền kéo của nhựa PETG là: chiều cao lớp in (mm), tốc độ in (mm/s), mật độ điền đầy (%) và kích thước vòi phun (mm) [4]. Các thông số thí nghiệm được trình bày cụ thể trong Bảng 1. Các thông số này bao gồm 4 thông số chính với 3 mức giá trị nên các thí nghiệm ma trận sử dụng mảng trực giao $L_9 (3^4)$ [7]. Tổng số lượng thí nghiệm riêng biệt để tiến hành in 3D FDM là 9. Mỗi thí nghiệm lặp lại 3 lần cần 3 mẫu để đo lực kéo đứt, như vậy tổng số mẫu là 27.

Bảng 1. Các thông số và mức giá trị trong thí nghiệm in 3D FDM.

Các thông số thí nghiệm	Ký hiệu	Mức giá trị		
		1	2	3
Chiều cao lớp in (mm)	A	0,1	0,2	0,3
Tốc độ in (mm/s)	B	50	60	70
Mật độ điền đầy (%)	C	20	30	40
Kích thước vòi phun (mm)	D	0,4	0,8	1,2

Thiết kế thực nghiệm theo phương pháp Taguchi chia làm 3 trường hợp: ‘Nhỏ hơn là tốt hơn’ (Smaller-the-better), ‘Trung bình là tốt nhất’ (Nominal-is-best) và ‘Lớn hơn là tốt hơn’ (Larger-the-better) [5,6]. Mẫu thử nhựa PETG được yêu cầu phải có độ bền kéo càng lớn càng tốt. Quá trình in 3D FDM là một trường hợp của mô hình ‘Lớn hơn là tốt hơn’. Công thức tính tỷ số S/N (η) xác định như sau [7]:

$$\eta = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (dB) \quad (1)$$

n: Số mẫu đo trong một thí nghiệm (n=3)

y_i : Lực kéo đứt mẫu thí nghiệm ở lần đo thứ i.

Mô hình ‘Lớn hơn là tốt hơn’ với mục tiêu tối ưu là xác định giá trị lớn nhất tỉ số S/N (η) với từng thông số in 3D [5,6]. Các thông số tối ưu in 3D FDM xác định dựa vào tỉ số S/N lớn nhất. Gọi η_{opt} là tỷ số S/N trong điều kiện tối ưu và được tính theo phương trình [7]:

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum (\eta_i - \eta_m) \quad (2)$$

η_{opt} : Giá trị S/N tối ưu; η_m : giá trị S/N trung bình chung; η_i : giá trị S/N ứng với nhân tố thứ i.

Nếu η_{op} xấp xỉ bằng tỉ số S/N thí nghiệm kiểm chứng (tương đương 90%) các nhân tố in 3D coi như độc lập, không phụ thuộc nhau [6, 7].

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Bộ thông số in 3D FDM tối ưu

Bảng 2 trình bày kết quả đo lực kéo đứt các mẫu nhựa PETG sau khi in 3D FDM. Mỗi thí nghiệm lặp lại 3 lần và tiến hành đo 3 mẫu thử. Tỷ số S/N của 4 thông số được minh họa Bảng 3. Dựa vào giá trị lớn nhất tỷ số S/N (η), Bộ thông số in tối ưu là sự kết hợp các thông số như sau: $A_1B_2C_3D_3$ (Hình 6 và Bảng 4). Bộ thông số in 3D tối ưu cho nhựa PETG bao gồm: chiều cao lớp in 0,1 (mm), tốc độ in 60 (mm/s), mật độ điền đầy 40 (%), kích thước vòi phun 1,2 (mm). Như vậy, nghiên cứu chỉ ra chiều cao lớp in nhỏ nhất và đường kính vòi phun lớn thì độ bền kéo tăng và mẫu in chắc và bền hơn. Vấn đề này có thể lý giải như sau: Trong in 3D FDM, chiều cao lớp in nhỏ giúp tăng độ bền kéo do diện tích tiếp xúc giữa các lớp lớn hơn và nhiệt độ lớp trước vẫn đủ cao để tăng cường khuếch tán phân tử. Nhờ đó, liên kết lớp được cải thiện và các khuyết tật rỗng giảm đáng kể. Đối với đường kính vòi phun, vòi lớn tạo ra sợi đùn có tiết diện lớn và áp lực ép cao hơn lên lớp bên dưới. Điều này làm giảm số đường in trên mỗi lớp, giảm khe hở và tăng độ đặc của cấu trúc. Kết quả là liên kết giữa các sợi in trở nên bền hơn, giúp mẫu có độ bền kéo cao hơn.

NGHIÊN CỨU BỘ THÔNG SỐ TỐI ƯU CÔNG NGHỆ IN 3D FDM ĐỂ CẢI TIẾN ĐỘ BỀN KÉO NHỰA PETG

Bảng 2: Kết quả đo lực kéo đứt nhựa PETG sau khi in 3D FDM.

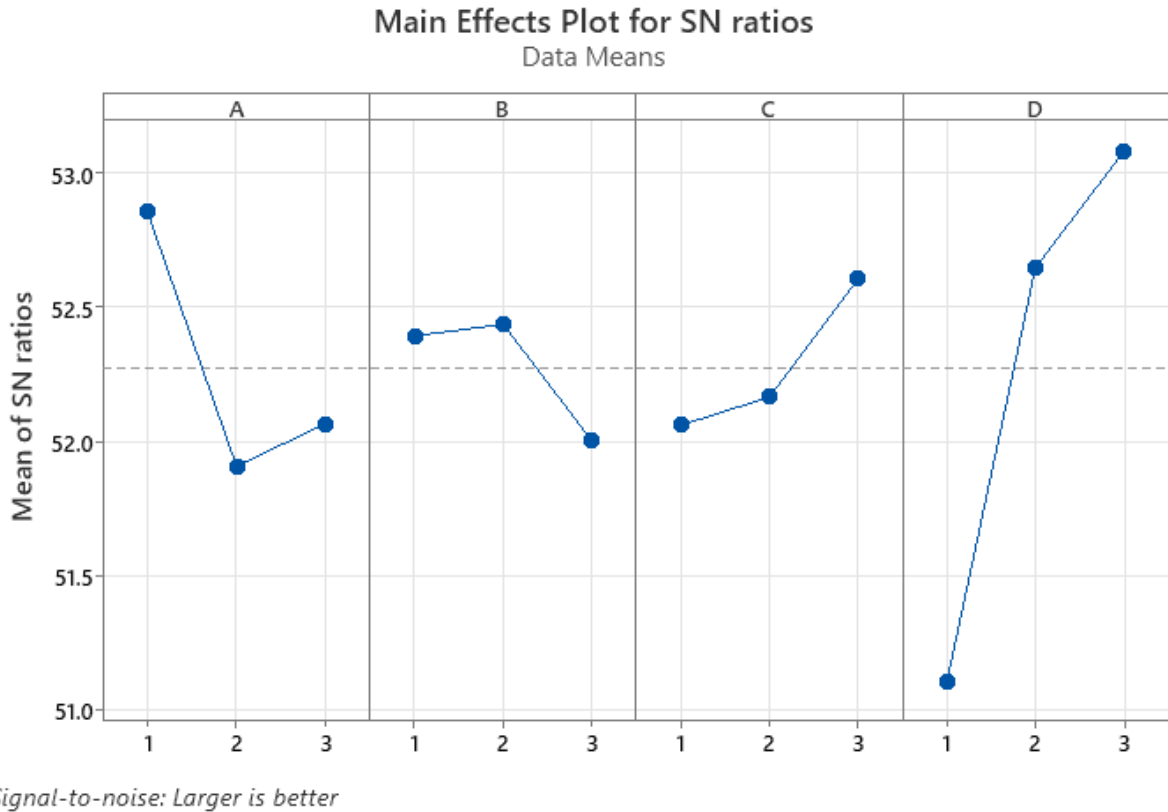
Mẫu thử	Thông số				Giá trị đo lực kéo đứt nhựa PETG (N)			Tỷ số S/N	Giá trị trung bình
	A	B	C	D	1	2	3	(dB)	(N)
1	1	1	1	1	369,07	456,48	338,79	51,580	388,113
2	1	2	2	2	454,52	475,99	453,54	53,274	461,35
3	1	3	3	3	496,47	479,42	479,61	53,714	485,167
4	2	1	2	3	455,11	406,6	439,73	52,717	433,813
5	2	2	3	1	385,14	364,07	345,45	51,217	364,887
6	2	3	1	2	382	365,64	424,05	51,784	390,563
7	3	1	3	2	404,84	448,25	478,34	52,882	443,81
8	3	2	1	3	384,19	477,16	469,71	52,812	443,687
9	3	3	2	1	371,52	318,11	322,52	50,500	337,383

Bảng 3: Giá trị S/N trung bình chung (dB).

Thông số	A	B	C	D
Mức 1	52,856	52,393	52,059	51,099
Mức 2	51,906	52,434	52,164	52,647
Mức 3	52,065	51,999	52,604	53,081
Trung bình	52,276			

Bảng 4: Giá trị các thông số in 3D FDM tối ưu.

Ký hiệu	Thông số	Giá trị
A	Chiều cao lớp (mm)	0,1
B	Tốc độ in (mm/s)	60
C	Mật độ điền đầy (%)	40
D	Kích thước vòi phun (mm)	1,2



Hình 6: Giá trị S/N các thông số A, B, C, D

Hình 6 thể hiện mức tối ưu của các biến thiết kế. Độ dốc của đồ thị càng lớn thì thể hiện biến thiết kế ảnh hưởng mạnh đến độ bền kéo. Theo đó, biến D là ảnh hưởng nhiều nhất, kế đến là biến A, tiếp theo là biến C và cuối cùng là biến B. Như vậy, nhân tố ảnh hưởng nhiều nhất đến độ bền kéo nhựa PETG là kích thước vòi phun.

3.2. Thí nghiệm kiểm chứng

Để kiểm tra độ tin cậy kết quả thí nghiệm Taguchi, các thí nghiệm kiểm chứng được tiến hành dựa vào bộ thông số in 3D tối ưu. 5 mẫu thử được thí nghiệm dựa vào thông số in 3D tối ưu. Kết quả đo lực kéo đứt của các mẫu thử là 465,11 (N) (Bảng 5). Với tiết diện tại vị trí gãy đứt là 40 (mm²), độ bền kéo của mẫu thử là:

$$\sigma = \frac{465,11}{40} = 11,62 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Bảng 5: Giá trị lực kéo đứt các mẫu thử PETG

Mẫu thí nghiệm kiểm chứng	Giá trị đo lực kéo đứt nhựa PETG (N)	Tỷ số S/N (dB)
1	473,83	53,512
2	456,29	53,185
3	496,48	53,918
4	452,37	53,110
5	446,59	52,998
Trung bình	465,11	53,345

Dựa vào Bảng 3, tỷ số S/N trung bình có giá trị $\eta_m = 52,276$. Như vậy, η_{opt} với điều kiện tối ưu xác định bởi công thức (2):

$$\begin{aligned} \eta_{opt} &= \eta_m + \sum(\eta_i - \eta_m) \\ &= 52,276 + (53,512 - 52,276) + (53,185 - 52,276) + (53,918 - 52,276) + \\ &\quad (52,998 - 52,276) + (53,345 - 52,276) = 58,691(dB) \end{aligned}$$

Theo lý thuyết Taguchi, nếu η_{op} xấp xỉ bằng S/N của thí nghiệm kiểm chứng (tương đương 90%) các nhân tố in 3D FDM được xem độc lập, không phụ thuộc nhau. Như vậy, so sánh giá trị $\eta_{opt} = 58,691$ (dB) với giá trị trung bình tỷ số S/N thí nghiệm kiểm chứng $\eta = 53,345$ (dB) (Bảng 5), 2 giá trị này xấp xỉ tương đương 91%. Do đó, các thông số in 3D xem như độc lập lẫn nhau.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xác định được các thông số tối ưu cho công nghệ in 3D FDM trên vật liệu nhựa PETG. Các thông số tối ưu dựa trên phân tích tỉ số tín hiệu nhiễu (S/N) bao gồm: chiều cao lớp in 0,1 mm, tốc độ in 60 mm/s, mật độ điền đầy 40% và kích thước vòi phun 1,2 mm. Kết quả phân tích cho thấy kích thước vòi phun là nhân tố có ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền kéo của nhựa PETG. Khi in với bộ thông số tối ưu, độ bền kéo của mẫu thử đạt 11,62 N/mm², cho thấy khả năng cải thiện hiệu suất cơ học của sản phẩm in 3D từ vật liệu PETG.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin trân trọng cảm ơn các đồng nghiệp vì những hỗ trợ quý báu trong quá trình thực hiện thí nghiệm, phân tích dữ liệu và hoàn thiện bản thảo bài viết. Chúng tôi cũng xin cảm ơn Công ty trách nhiệm hữu hạn ILAB vì những hỗ trợ phần đo lực kéo đứt các mẫu nhựa PETG.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] 3D smartsolutions (2022, 21/07) Nhựa PETG và những lưu ý cần biết khi sử dụng in 3D. Available: <https://3d-smartsolutions.com/nhua-petg-la-gi/>
- [2] V. A. Balogun, O. B. Otanocha, and A. O. Ibadode, "The Impact of 3D Printing Technology to the Nigerian Manufacturing GDP," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 08, no. 02, pp. 140-157, 2018.
- [3] Y. Magdum, D. Pandey, A. Bankar, S. Harshe, V. Parab, and M. M. S. Kadam, "Process Parameter Optimization for FDM 3D Printer," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 06, no. 04, pp. 1-6, 2019.
- [4] S. Shetty et al., "3D printed Polyether ether ketone (PEEK), Polyamide (PA) and its evaluation of mechanical properties and its uses in healthcare applications," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1224, no. 1, 2022.
- [5] Guia Lorraine R. Ong, Johan Mikaela A. Simon, Jonah Marie T. Chan, and Warren Miguel G. Benito, "Use of Taguchi Method-Based Design of Experiments (DOE) in the Optimization of the Drilling Parameters of Structural A572 Steel," *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Manila, Philippines, 2023*.
- [6] M. T. Nguyen, *Quy Hoạch Thực Nghiệm*, NXB Xây dựng, 2021.
- [7] R. K. Roy, *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*, Wiley-Interscience, 2001.

RESEARCH ON OPTIMAL PARAMETERS OF FDM 3D PRINTING TECHNOLOGY TO IMPROVE THE TENSILE STRENGTH OF PETG PLASTIC

HUU LOC PHAM

Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City,

**Corresponding author: phamhuuloc@iuh.edu.vn*

Abstract. As 3D printing becomes increasingly prevalent in rapid manufacturing, prototyping, and the production of technical components, optimizing the mechanical performance of printed materials is essential for broadening their practical use. This study aims to improve the tensile strength of PETG, a widely used material in Fused Deposition Modelling (FDM) due to its favorable mechanical properties and ease of processing. Key printing parameters influencing tensile strength were examined and optimized using the Taguchi method. Based on the highest signal-to-noise (S/N) ratio, the optimal FDM settings were identified as a 0.1 mm layer height, 60 mm/s printing speed, 40% infill density, and a 1.2 mm nozzle diameter. Using these optimized conditions, the PETG specimens achieved a tensile strength of 11.62 N/mm². The findings provide both scientific and practical insights that can help improve the quality of PETG 3D-printed parts and guide the selection of suitable printing parameters for applications requiring enhanced mechanical performance.

Keywords. PETG resin, Taguchi, FDM 3D printing, optimal, ratio S/N.

Ngày nhận bài: 13/06/2025

Ngày chấp nhận đăng: 12/12/2025