

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ FDM ĐẾN ĐỘ BỀN KÉO VÀ ĐỘ DAI VÀ ĐẬP CỦA SẢN PHẨM IN 3D TỪ VẬT LIỆU PLA

INVESTIGATION INTO THE EFFECTS OF FDM PROCESS PARAMETERS ON THE TENSILE STRENGTH AND IMPACT TOUGHNESS OF 3D-PRINTED PLA PARTS

NGUYỄN BÌNH DƯƠNG, ĐINH XUÂN THÀNH*

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: thanhdx.vck@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.935>

Tóm tắt

Phần này tóm tắt mục đích của bài viết, giúp độc giả hiểu rõ nghiên cứu này khảo sát thực nghiệm ảnh hưởng của bốn thông số bao gồm nhiệt độ in, tốc độ in, đường kính đầu in và tỷ lệ điền đầy đến độ bền kéo và độ dai va đập của vật liệu PLA. Kết quả thực nghiệm cho thấy tỷ lệ điền đầy là yếu tố có ảnh hưởng mạnh đến cả hai chỉ tiêu cơ tính. Nhiệt độ in 220°C và tốc độ in 50mm/s đều cho vật in có độ bền kéo và độ dai va đập tốt, trong khi việc tăng nhiệt độ quá cao gây ra hiện tượng phân hủy nhiệt và hình thành lỗ rỗng lớn quan sát được qua ảnh SEM. Đường kính đầu in có tác động trái chiều đến hai chỉ tiêu nghiên cứu, trong khi đầu in lớn cải thiện độ bền kéo lên tới 25,7MPa nhờ cải thiện khả năng liên kết và giảm lỗ rỗng tại bề mặt phân lớp thì đầu in nhỏ lại tối ưu hơn cho độ dai va đập nhờ cấu trúc nhiều lớp và mịn làm phân tán và đổi hướng quá trình phá hủy. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở dữ liệu quan trọng để lựa chọn thông số in phù hợp tùy theo điều kiện chịu tải tĩnh hay động của sản phẩm,...

Từ khóa: In 3D, FDM, PLA, độ bền kéo, độ dai va đập.

Abstract

This study experimentally investigates the influence of four parameters, including printing temperature, printing speed, nozzle diameter, and infill density, on the tensile strength and impact toughness of PLA material. Experimental results indicate that infill density significantly influences both mechanical properties. A printing temperature of 220°C and a speed of 50mm/s yielded good tensile strength and impact toughness; conversely, excessively high temperatures caused thermal degradation and the

formation of large voids, as observed via SEM analysis. Notably, nozzle diameter exhibited a contrasting effect on the two properties: while a larger nozzle improved tensile strength up to 25.7MPa by enhancing bonding and reducing voids, a smaller nozzle was optimal for impact toughness due to a fine layered structure that inhibits crack propagation. These findings provide a valuable database for selecting appropriate printing parameters based on whether the product is subjected to static or dynamic loading conditions.

Keywords: 3D printing, FDM, PLA, tensile strength, impact toughness.

1. Mở đầu

Trong thập kỷ qua, công nghệ chế tạo bồi đắp (AM) hay còn gọi là in 3D, đã phát triển từ một công cụ tạo mẫu nhanh trở thành một phương pháp sản xuất chủ đạo trong nhiều lĩnh vực như hàng không vũ trụ, y sinh và ô tô (Liu et al., 2023). Không giống như các quy trình sản xuất truyền thống, AM xây dựng các vật thể ba chiều trực tiếp từ mô hình thiết kế hỗ trợ bởi máy tính (CAD) thông qua việc lắng đọng vật liệu theo từng lớp. Phương pháp này mang lại những lợi ích vượt trội, bao gồm khả năng chế tạo các hình học phức tạp và tối ưu hóa, giảm đáng kể thời gian đưa sản phẩm ra thị trường và giảm thiểu lãng phí vật liệu (Ngo et al., 2018).

Trong số các công nghệ AM, mô hình hóa lắng đọng nóng chảy (FDM) hay còn gọi là chế tạo sợi nóng chảy (FFF) đã trở nên phổ biến do chi phí đầu tư ban đầu thấp, vận hành đơn giản và sự đa dạng của vật liệu nhiệt dẻo (Dimitrellou et al., 2025). Các vật liệu như Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polyamide (PA) và đặc biệt là Axit Polylactic (PLA) được sử dụng rộng rãi. PLA là một loại polymer sinh học có nguồn gốc từ thực vật như tinh bột ngô đã thu

hút sự chú ý đặc biệt nhờ khả năng phân hủy, tương thích sinh học và tính dễ in, khiến nó trở thành lựa chọn hàng đầu cho cả mục đích tạo mẫu và sản xuất các chi tiết chức năng (Hussain et al., 2024).

Tuy nhiên, một thách thức lớn của các chi tiết FDM là đặc tính cơ học. Do quy trình đắp vật liệu theo từng lớp, các sản phẩm in 3D thường thể hiện tính dị hướng và có độ bền cơ học, đặc biệt là độ bền liên kết giữa các lớp thấp hơn so với các phương pháp như ép phun, đúc (Omer et al., 2025). Các đặc tính cơ học này phụ thuộc rất lớn vào các thông số công nghệ được lựa chọn trong quá trình chuẩn bị file in.

Nhiều công trình đã tập trung vào việc tối ưu hóa các thông số này. Mishra và cộng sự đã nghiên cứu chi tiết ảnh hưởng của độ dày lớp, mật độ điền đầy và tốc độ in đối với các đặc tính nén của vật liệu composite PLA-gỗ (Mishra et al., 2025). Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra độ bền nén được cải thiện khi giảm độ dày lớp in, giảm tốc độ in và tăng mật độ điền đầy. Nguyên nhân chính được cho là sự liên kết tốt hơn giữa các lớp in và sự giảm thiểu các lỗ rỗng vi mô bên trong cấu trúc. Khi khảo sát vật liệu composite gỗ - PLA, Sultana và cộng sự đã sử dụng phương pháp Taguchi L9 và khẳng định chiều dày lớp in là yếu tố quan trọng nhất, đóng góp tới 69,43% vào sự thay đổi độ bền kéo, trong khi ảnh hưởng của tốc độ in và nhiệt độ đầu phun là không đáng kể (Sultana et al., 2025). Trái ngược với kết quả trên, đối với vật liệu composite polymer cốt sợi carbon (CFRP), Lestari và các cộng sự lại chỉ ra rằng mật độ điền đầy mới là yếu tố tiên quyết, đóng góp tới 65,57% vào độ bền va đập, trong khi chiều dày lớp in chỉ đóng góp 18,31% (Lestari et al., 2025). Bên cạnh đó, đối với các dòng nhựa kỹ thuật hiệu suất cao, vai trò của các thông số nhiệt độ lại trở nên nổi bật hơn cả. Tafaoli-Masoule và cộng sự cũng như cộng sự khi nghiên cứu về PEEK đều nhấn mạnh nhiệt độ buồng in và nhiệt độ đầu phun đóng vai trò quyết định đến độ kết tinh và chất lượng liên kết lớp, ảnh hưởng trực tiếp đến độ bền kéo và nén (Sikder et al., 2022; Tafaoli-Masoule et al., 2024). Tương tự, Cicek và Johnson đã áp dụng phương pháp phân tích quan hệ xám (GRA) trên vật liệu PC để tối ưu hóa đa mục tiêu, chứng minh việc kiểm soát chặt chẽ nhiệt độ in kết hợp với tốc độ in thấp có thể cải thiện độ bền kéo lên tới 141% so với thông số mặc định (Cicek & Johnson, 2025).

Mặc dù vậy, các nghiên cứu hiện tại phần lớn vẫn tập trung vào các vật liệu composite đặc biệt hoặc nhựa kỹ thuật cao, trong khi nhựa PLA sinh học chưa được chú trọng. Các thông số công nghệ quan trọng khác như nhiệt độ in ảnh hưởng trực tiếp đến độ chảy

lòng của vật liệu và chất lượng liên kết lớp, đường kính đầu in ảnh hưởng đến tốc độ đắp và đặc tính truyền nhiệt vẫn chưa được khảo sát một cách hệ thống và đồng thời.

Để giải quyết những vấn đề trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm khảo sát ảnh hưởng của bốn thông số công nghệ FDM then chốt đến một số đặc tính cơ học quan trọng. Nghiên cứu sẽ tập trung vào việc đánh giá sự thay đổi của độ bền kéo và độ dai va đập của các mẫu in 3D sử dụng vật liệu PLA khi thay đổi các thông số: Nhiệt độ in (200, 220, 240°C), tốc độ in (50, 70, 90mm/s), đường kính đầu in (0,2, 0,4, 0,6 mm) và tỷ lệ điền đầy (50, 70, 90%). Kết quả của nghiên cứu này sẽ cung cấp một bộ dữ liệu thực nghiệm giá trị, giúp các kỹ sư và nhà thiết kế tối ưu hóa quy trình FDM để đạt được các sản phẩm có độ bền cơ học mong muốn cho các ứng dụng thực tiễn.

2. Nguyên liệu và phương pháp thực nghiệm

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Vật liệu nguyên liệu được sử dụng trong nghiên cứu này là sợi nhựa in 3D PLA plus thương mại, do hãng e-SUN, Trung Quốc sản xuất. Sợi nhựa có đường kính danh nghĩa 1,75mm. PLA được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu do đặc tính phân hủy sinh học, tính ổn định nhiệt tốt và mức độ phổ biến cao trong các ứng dụng kỹ thuật FDM. Để loại bỏ ảnh hưởng của độ ẩm môi trường đến quá trình thủy phân nhiệt trong khi in, yếu tố có thể gây ra hiện tượng tạo bọt và làm giảm cơ tính liên kết lớp, vật liệu PLA được sấy khô trong tủ sấy đối lưu ở nhiệt độ 50°C trong thời gian 4 giờ trước khi đưa vào quy trình tạo mẫu. Các cuộn PLA sau khi sấy được bảo quản trong hộp kín có chứa hạt hút ẩm trong suốt quá trình thực nghiệm.

2.2. Thiết bị chế tạo và phương pháp thực nghiệm

Quá trình chế tạo mẫu thử nghiệm được thực hiện trên hệ thống máy in 3D FDM đa sắc tự nghiên cứu và phát triển. Thiết bị này được thiết kế và lắp ráp với khung cơ khí chính xác bằng nhôm định hình, sử dụng cơ cấu chuyển động core XY để đảm bảo độ ổn định cao ở các tốc độ in khác nhau. Máy in được trang bị hệ thống đùn có khả năng thay thế đầu phun linh hoạt, cho phép khảo sát các đường kính đầu in khác nhau mà không làm thay đổi kết cấu động học của máy. Trước khi tiến hành in mẫu, thiết bị được hiệu chuẩn bàn in và bước đùn để đảm bảo độ chính xác về kích thước và lưu lượng vật liệu.

Nghiên cứu áp dụng phương pháp thực nghiệm để khảo sát ảnh hưởng của bốn thông số công nghệ chính

đến các đặc tính cơ học của vật liệu. Các thông số biến thiên và các mức giá trị khảo sát được trình bày chi tiết trong Bảng 1.

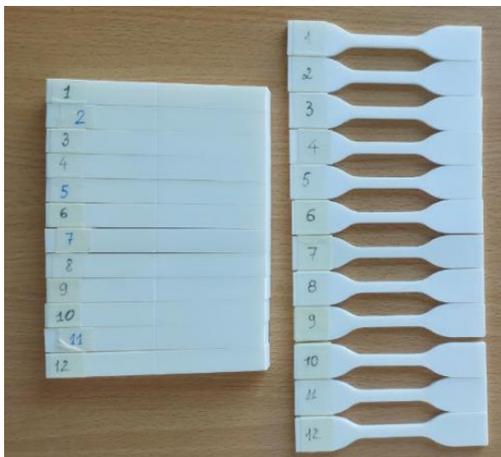
Bảng 1. Các thông số công nghệ và mức khảo sát

Thông số	Đơn vị	Phạm vi nghiên cứu
Nhiệt độ in	°C	200, 220, 240
Tốc độ in	mm/s	30, 50, 70
Đường kính đầu in	mm	0.2, 0.4, 0.6
Tỷ lệ điền đầy	%	50, 70, 90

Các thông số khác như nhiệt độ bàn in 60°C, chiều dày lớp in 0,15mm, kiểu điền đầy dạng lưới Grid và số lớp đường viền bằng 3 được giữ cố định. Trong quá trình in, khi thay đổi thông số cần nghiên cứu thì các thông số công nghệ còn lại được giữ cố định ở mức trung bình để cô lập các yếu tố ảnh hưởng.

2.3. Phương pháp đánh giá cơ tính

Một số đặc tính cơ học của mẫu in dưới các chế độ công nghệ khác nhau được đánh giá gồm độ bền kéo, và độ dai va đập. Các mẫu thử kéo được thiết kế và in theo tiêu chuẩn ASTM D638 dạng mẫu Type IV (Hình 1). Quá trình thử nghiệm được thực hiện trên máy thử kéo vạn năng SANS CMT5000 Series. Tốc độ kéo được thiết lập không đổi ở mức 5mm/phút.



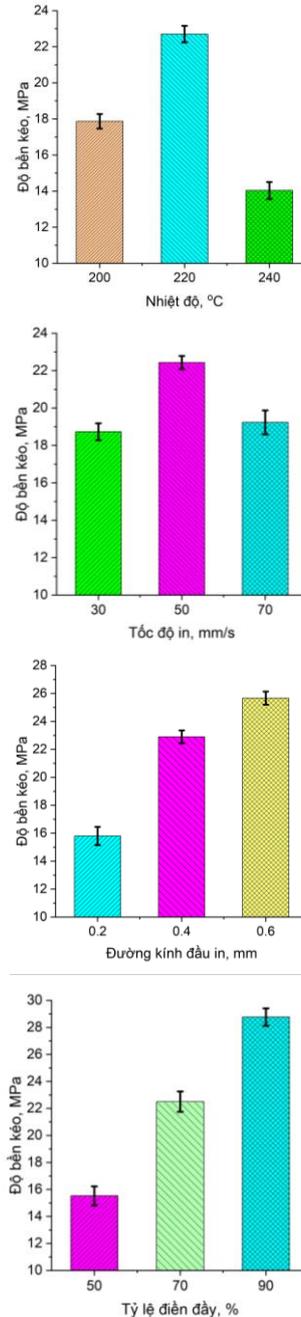
Hình 1. Mẫu đo độ bền kéo và độ dai va đập

Độ dai va đập được xác định thông qua phương pháp thử va đập Charpy có rãnh theo tiêu chuẩn ASTM D256. Thử nghiệm được thực hiện trên máy thử va đập con lắc JBS-300 Jinan. Năng lượng hấp thụ trong quá trình phá hủy mẫu sẽ được ghi nhận để tính toán độ dai va, phản ánh khả năng kháng lại sự phát triển vết nứt của vật liệu dưới tải trọng động. Tại mỗi chế độ công nghệ, phép đo cơ tính được thực hiện với 3 mẫu lặp lại để đảm bảo độ tin cậy của kết quả.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng thông số đến độ bền kéo

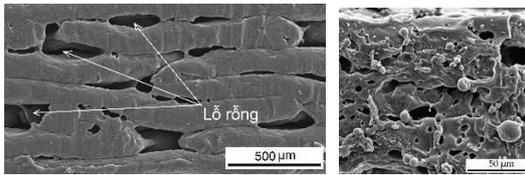
Kết quả thực nghiệm về ảnh hưởng của nhiệt độ in, tốc độ in, đường kính đầu in và tỷ lệ điền đầy đến độ bền kéo của mẫu in 3D PLA được thể hiện chi tiết trong Hình 2.



Hình 2. Đồ thị ảnh hưởng thông số in đến độ bền kéo của mẫu in

Từ kết quả Hình 2 cho thấy độ bền kéo biến thiên theo quy luật hình parabol khi nhiệt độ tăng dần. Độ bền kéo đạt giá trị cực đại 22,7MPa tại nhiệt độ 220°C.

Ở mức nhiệt độ thấp hơn là 200°C, vật liệu chưa đạt được độ chảy loãng tối ưu, độ nhớt cao cản trở khả năng khuếch tán và hòa trộn giữa các lớp in, dẫn đến liên kết lớp yếu và làm giảm cơ tính tổng thể. Ngược lại, khi nhiệt độ tăng quá cao lên 240°C, độ bền kéo suy giảm đáng kể xuống còn khoảng 14MPa. Hiện tượng này có thể được giải thích do sự phân hủy nhiệt của chuỗi polymer PLA khi chịu nhiệt độ cao trong thời gian dài, dẫn đến sự phá vỡ cấu trúc phân tử và làm giòn vật liệu cùng với đó làm mất sự liên kết giữa các lớp tạo ra các lỗ rỗng kích thước lớn. Hình 3 thể hiện cấu trúc của vật liệu PLA được nghiên cứu bằng thiết bị hiển vi điện tử Jeol JSM-6490 cho thấy sự hình thành các lỗ rỗng giữa các lớp in và ngay trong cấu trúc của đường in do phân hủy nhiệt. Kết quả này tương đồng với nhận định của Lestari và cộng sự, khi cho rằng nhiệt độ vòi phun vượt quá ngưỡng phân hủy sẽ làm giảm độ bền của polymer (Lestari et al., 2025).



Hình 3. Sự phân hủy PLA khi in nhiệt độ cao tạo các lỗ rỗng lớn giữa các lớp in và trong đường in

Tốc độ in đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát thời gian lắng đọng và truyền nhiệt. Kết quả thực nghiệm cho thấy tốc độ in 50mm/s mang lại độ bền kéo tốt nhất. Khi tốc độ in tăng lên 70mm/s, độ bền kéo có xu hướng giảm. Nguyên nhân chính là do thời gian tương tác nhiệt giữa sợi nhựa vừa đùn và lớp in trước đó bị rút ngắn, không đủ để hình thành liên kết bền vững giữa các lớp, dẫn đến hiện tượng tách lớp dưới tác dụng của lực kéo. Cơ chế này cũng đã được Mishra và cộng sự khẳng định trong nghiên cứu của họ, khi tốc độ in cao gây ra sự không đồng nhất trong quá trình lắng đọng và làm tăng độ xốp khí (Mishra et al., 2025). Trong khi đó, tốc độ in 30mm/s cũng cho độ bền kéo thấp hơn so với 50mm/s. Điều này có khác biệt so với một số kết quả nghiên cứu khác như của Umur và cộng sự khi nghiên cứu với vật liệu PC (Cicek & Johnson, 2025), nhưng có thể giải thích với vận tốc in quá chậm có thể gây ra hiện tượng tích nhiệt quá mức và thời gian in quá lâu gây biến tính lên vật liệu PLA. Do vậy tốc độ in quá chậm trong trường hợp này có thể làm giảm độ bền kéo của mẫu in.

Kết quả đáng chú ý trong nghiên cứu này là sự gia tăng tuyến tính của độ bền kéo theo đường kính đầu in. Mẫu in sử dụng đầu in 0,6mm cho độ bền cao nhất

đạt 25,7MPa vượt trội so với đầu in 0,2mm chỉ đạt khoảng 15,8MPa. Việc sử dụng đầu in kích thước lớn giúp tạo ra các đường in rộng hơn trong khi chiều dày lớp in được cố định không đổi ở 0,15mm, điều này sẽ tạo áp lực của đường in sau lên đường in trước giúp nhựa in được điền đầy vào các khe hở giữ các đường in. Điều đó đồng nghĩa với việc giảm thiểu số lượng các vị trí có nguy cơ hình thành lỗ rỗng vì mô giữa các đường in, tạo liên kết tốt hơn từ đó cải thiện đáng kể khả năng chịu tải kéo của mẫu.

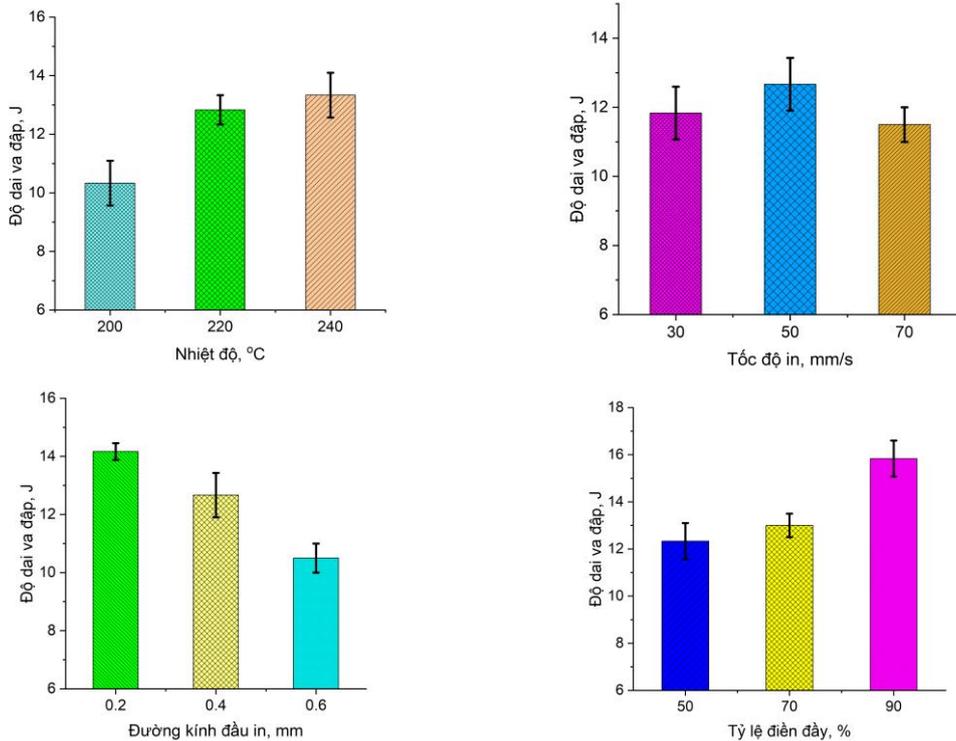
Tương tự như các nghiên cứu trước đây, tỷ lệ điền đầy thể hiện mối quan hệ tỷ lệ thuận rõ rệt với độ bền kéo. Khi tăng mật độ điền đầy từ 50% lên 90%, độ bền kéo tăng mạnh từ khoảng 14,8MPa lên gần 29,5MPa. Mật độ điền đầy cao đồng nghĩa với việc gia tăng lượng vật liệu chịu lực thực tế trong cấu trúc và giảm thiểu các khoảng trống không khí bên trong. Cấu trúc đặc khít hơn giúp phân bố ứng suất đều hơn và hạn chế sự phát triển của các vết nứt tế vi khi chịu tải trọng kéo.

3.2. Ảnh hưởng thông số đến độ dai và đập.

Khả năng kháng tải trọng va đập hay độ dai và đập phản ánh năng lượng mà vật liệu có thể hấp thụ trước khi bị phá hủy hoàn toàn dưới tải trọng đột ngột. Kết quả thực nghiệm về độ dai và đập Charpy của các mẫu in PLA được trình bày trong Hình 4.

Kết quả từ Hình 4 cho thấy độ dai và đập có xu hướng tăng khi nhiệt độ in tăng. Tại 200°C, độ dai và đập đạt mức thấp nhất 10,3J. Khi nhiệt độ tăng lên 220°C và 240°C, giá trị này tăng lên đáng kể và đạt lần lượt là 12,8J và 13,3J. Cơ chế này được lý giải thông qua quá trình khuếch tán phân tử. Nhiệt độ cao làm giảm độ nhớt của PLA lỏng, thúc đẩy quá trình thấm ướt và khuếch tán chuỗi polymer tại bề mặt tiếp xúc giữa các lớp in mới và lớp đã đông đặc. Sự liên kết nội phân tử chặt chẽ hơn giúp mẫu in hạn chế sự phát triển của các vết nứt khi chịu va đập, từ đó hấp thụ năng lượng tốt hơn. Ngược lại, ở nhiệt độ thấp, năng lượng nhiệt không đủ để liên kết hoàn toàn các bề mặt lớp in, tạo ra các điểm yếu cục bộ dễ bị phá hủy dưới tải trọng động.

Khác với độ bền kéo, độ dai và đập đạt giá trị tối ưu tại tốc độ in trung bình là 50mm/s (đạt 12,7J). Tại tốc độ in thấp hơn là 30mm/s, thời gian gia nhiệt kéo dài có thể gây ra hiện tượng ủ nhiệt không mong muốn hoặc biến tính nhẹ vật liệu, làm giảm nhẹ độ dẻo dai. Với tốc độ in 70mm/s, độ dai và đập giảm xuống còn 11,5J. Nguyên nhân là do thời gian lắng đọng quá nhanh khiến vật liệu không kịp lấp đầy các khoảng trống vi mô và không đủ thời gian để hình thành liên kết vững chắc giữa các lớp. Sự gia tăng các lỗ rỗng

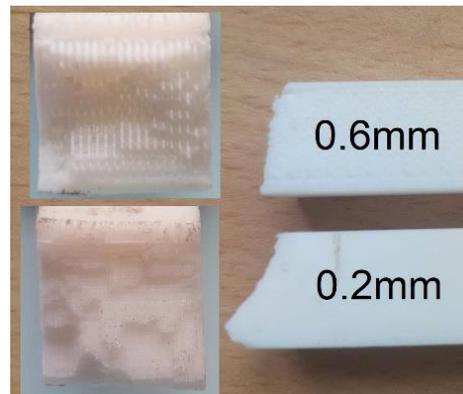


Hình 4. Đồ thị ảnh hưởng thông số in đến độ dai va đập của mẫu in

khí tại tốc độ cao có thể đóng vai trò như các điểm tập trung ứng suất, làm giảm khả năng hấp thụ năng lượng của mẫu.

Ảnh hưởng của đường kính đầu in đến độ dai va đập trái ngược với kết quả độ bền kéo, độ dai va đập có xu hướng giảm khi tăng đường kính đầu in. Mẫu in với đầu phun nhỏ 0,2mm cho độ dai va đập cao nhất đạt 14,2J, trong khi đầu phun 0,6mm chỉ đạt 10,5J. Sự gia tăng độ dai va đập khi sử dụng đường kính in nhỏ có thể được lý giải thông qua cơ chế hấp thụ năng lượng tại các bề mặt tiếp xúc. Mặc dù đường kính nhỏ tạo ra các đường in mịn và mật độ biên giới lớp dày đặc, nhưng quá trình in có thể hình thành các liên kết yếu cục bộ hoặc các khe hở vi mô giữa các đường in liền kề. Đối với độ bền kéo, các khe hở vi mô này đóng vai trò là điểm tập trung ứng suất làm giảm khả năng chịu tải kéo. Tuy nhiên, dưới tác dụng của tải trọng va đập, cấu trúc nhiều lớp với các khe hở này lại phát huy tác dụng tích cực trong việc ngăn cản sự lan truyền của vết nứt. Thay vì phá hủy giòn xuyên suốt như ở mẫu in đầu phun lớn nơi vật liệu liên kết đồng nhất hơn, các vết nứt trong mẫu sử dụng đầu in nhỏ cho thấy quá trình phá hủy bị đổi hướng, phân tán hoặc bị chặn lại tại các bề mặt phân cách lớp. Quá trình này làm tăng quãng đường lan truyền của vết nứt, từ đó tiêu tán nhiều năng lượng hơn và nâng cao độ dai va đập của sản phẩm. Hình 5 cho thấy vị trí phá

hủy khi đo va đập mẫu in sử dụng đầu in 0,2 và 0,6 mm, với đầu in 0,6mm mặt phá hủy gần phẳng và xuyên suốt từ vị trí có vết khía. Trong khi với đầu in 0,2, mặt phá hủy không liên tục và bị đổi hướng liên tục tại vị trí phân cách giữa các lớp in.



Hình 5. Hình thái bề mặt phá hủy khi đo va đập mẫu sử dụng đầu in 0,2mm và 0,6mm

Tỷ lệ điền đầy là yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất đến độ dai va đập. Đồ thị Hình 4 cho thấy sự gia tăng tuyến tính rõ rệt từ khoảng 12,3J ở mức 50% lên tới 15,8J ở mức 90%. Cơ chế này hoàn toàn dựa trên khối lượng vật liệu chịu lực. Mật độ điền đầy cao đồng nghĩa với việc có nhiều vật liệu PLA hơn tham gia vào quá trình cản trở sự di chuyển của vết nứt phá hủy.

Cấu trúc lớp dày đặc hơn giúp phân tán năng lượng và đập hiệu quả hơn ra toàn bộ thể tích mẫu, thay vì tập trung phá hủy cục bộ tại các vị trí rỗng.

Công nghệ in 3D FDM vật liệu nhựa nói chung ghi nhận một số nhược điểm như sự liên kết kém giữa các lớp in và sự xuất hiện các lỗ rỗng vi mô làm suy yếu sự bám dính bề mặt và làm giảm một số cơ tính của vật in. Việc điều chỉnh thông số in có thể khắc phục được một phần những nhược điểm này, tuy nhiên sẽ có những cơ tính sẽ thay đổi trái chiều nhau như sự phụ thuộc độ dai va đập và độ bền kéo vào đường kính đầu in trong nghiên cứu này. Do vậy, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào tác động kết hợp của nhiều thông số in đối với các tính chất cơ học và tối ưu hóa các thông số in để đạt được các tính chất cơ học cân bằng.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ in 3D FDM đến cơ tính của vật liệu PLA, từ đó rút ra các kết luận sau:

- Nhiệt độ in 220°C và tốc độ in 50mm/s mang lại cơ tính tổng thể tốt, vật liệu đạt sự cân bằng giữa khả năng liên kết lớp và hạn chế sự phân hủy nhiệt.

- Tỷ lệ điền đầy có ảnh hưởng mạnh đến cơ tính vật in, việc tăng tỷ lệ điền đầy lên 90% giúp cải thiện đáng kể cả độ bền kéo và độ dai va đập.

- Đầu in lớn phù hợp cho các chi tiết chịu tải tĩnh nhờ giảm số lượng biên giới lớp cũng như liên kết tốt giữa các lớp tạo vật in gần như đồng nhất. Ngược lại, đầu in nhỏ lại cho các chi tiết cần khả năng chịu va đập hoặc tải trọng động nhờ cấu trúc lớp mịn giúp cản trở sự lan truyền phá hủy.

Kết quả này cho thấy cần mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo về tác động kết hợp và tối ưu hóa đa mục tiêu để cân bằng các đặc tính cơ học vật in.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.59**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] U. I. Cicek and A. A. Johnson (2025). *Multi-objective optimization of FDM process parameters for 3D-printed polycarbonate using Taguchi-based Gray Relational Analysis*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.137, No.7, pp.37093725.
doi: 10.1007/s00170-025-15392-3.
- [2] S. Dimitrellou, E. Strantzali, and I. Iakovidis (2025). *A decision-making strategy for selection of*

FDM-based additively manufactured thermoplastics for industrial applications based on material attributes, Sustainable Futures, Vol.9, p. 100640.

doi: 10.1016/j.sft.2025.100640.

- [3] M. Hussain, S. M. Khan, M. Shafiq, and N. Abbas (2024). *A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications*, Giant, Vol.18, p. 100261.

doi: 10.1016/j.giant.2024.100261.

- [4] W. D. Lestari, A. S. Mukti, N. Adyono, I. G. S. M. Diyasa, N. K. Sari, W. Caesarendra, C. Sari, N. Rachmat, and I. Budiwan (2025). *Optimization of 3D printing parameters for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) material: Impact and hardness analysis using Taguchi method*, Results in Materials, Vol.27, p. 100727.

doi: 10.1016/j.rinma.2025.100727.

- [5] Y. Liu, S. Lu, J. Luo, Y. Zhao, J. He, C. Liu, Z. Chen, and X. Yu (2023). *Research progress of antistatic-reinforced polymer materials: A review*, Polymers for Advanced Technologies, Vol.34, No.4, pp. 1120-1144.

doi: 10.1002/pat.5978.

- [6] D. K. Mishra, J. Giri, T. Sathish, M. Kanan, and D. Prajapati (2025). *Influence of 3D printing process parameters on mechanical properties of PLA based ceramic composite parts*, Results in Engineering, Vol.25, p. 104488.

doi: 10.1016/j.rineng.2025.104488.

- [7] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui (2018). *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*, Composites Part B: Engineering, Vol.143, pp.172-196.

doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

- [8] M. A. E. Omer, I. A. Shaban, A.-H. Mourad, and H. Hegab (2025). *Advances in interlayer bonding in fused deposition modelling: a comprehensive review*, Virtual and Physical Prototyping, Vol.20, No.1, p. e2522951.

doi: 10.1080/17452759.2025.2522951.

- [9] P. Sikder, B. T. Challa, and S. K. Gummadi (2022). *A comprehensive analysis on the processing-structure-property relationships of FDM-based 3-D printed polyetheretherketone (PEEK) structures*,

Materialia, Vol.22, p. 101427.

doi: 10.1016/j.mtla.2022.101427.

- [10] M. N. Sultana, O. S. Sarker, and N. R. Dhar (2025). *Parametric optimization and sensitivity analysis of the integrated Taguchi-CRITIC-EDAS method to enhance the surface quality and tensile test behavior of 3D printed PLA and ABS parts*, Heliyon, Vol.11, No.1, p. e41289.
doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41289.

- [11] M. Tafaoli-Masoule, M. Shakeri, S. A. Zahedi, and M. Vaezi (2024). *Experimental investigation of process parameters in polyether ether ketone 3D printing*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol.238, No.1, pp.267-279.
doi: 10.1177/09544089221141554.

Ngày nhận bài:	15/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	02/01/2026
Ngày duyệt đăng:	07/01/2026