

ĐIỀU TRA KHẢ NĂNG CHỊU NÉN CỦA MỘT SỐ CẤU TRÚC ĐIỀN ĐẦY KHI IN 3D FDM DÙNG VẬT LIỆU NHỰA PLA

INVESTIGATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF INFILL PATTERNS WHEN 3D FDM PRINTING WITH PLA PLASTIC MATERIAL

Trần Minh Sang, Nguyễn Lê Minh*, Trần Phước Thanh, Nguyễn Tấn Minh,
Trần Văn Tiến, Phạm Nguyễn Quốc Huy

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nlmhinh@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 17/11/2023; Sửa bài / Revised: 03/01/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 09/01/2024)

Tóm tắt - Nghiên cứu điều tra khả năng chịu nén của 05 cấu trúc điền đầy: Grid, Rectilinear, 3D honeycomb, Triangles và Cross khi in 3D FDM dùng vật liệu nhựa PLA. Mẫu thử được in theo tiêu chuẩn ASTM D695-15 để kiểm tra bền nén. Các mẫu thử được hiệu chỉnh theo tỉ lệ phần trăm điền đầy để đạt cùng khối lượng tại 3 mức 1,5 g, 2,1 g và 2,6 g; trong đó, sai khác khối lượng không vượt quá 1%. Kết quả, các cấu trúc Cross, Grid, và Triangles được xếp vào nhóm có khả năng chịu nén cao hơn so với nhóm cấu trúc 3D honeycomb và Rectilinear cho cả 03 mức khối lượng. Mặt khác, khả năng chịu nén có sự thay đổi thứ tự xếp hạng tại các mức khối lượng của mẫu thử. Điều này cho thấy, ngoài tác động của khối lượng mẫu thì còn nhiều yếu tố khác ảnh hưởng đến khả năng kháng nén của các cấu trúc điền đầy và cần các nghiên cứu sâu hơn trong thời gian tới.

Từ khóa - Kỹ thuật in 3D FDM; cấu trúc điền đầy; ASTM D695-15; độ bền nén; phần trăm điền đầy

1. Tổng quan

Công nghệ tạo mẫu nhanh, còn gọi là in 3D hoặc kỹ thuật sản xuất bồi đắp, tạo ra các vật thể vật lý từ một biểu diễn hình học bằng cách bồi đắp liên tục vật liệu theo từng lớp. Công nghệ in 3D đang phát triển nhanh chóng và được sử dụng rộng rãi trên thế giới do có ưu điểm nổi trội về khả năng tùy chỉnh thiết kế để sản xuất các chi tiết từ đơn giản đến phức tạp trong nhiều lĩnh vực: nông nghiệp, y tế, công nghiệp ô tô, công nghiệp tự động và công nghiệp hàng không... [1]. Vật liệu sử dụng trong in 3D rất đa dạng: vật liệu thông minh, nhựa dẻo, ceramics, vật liệu dẫn điện, vật liệu y sinh, vật liệu dựa trên graphene, kim loại, composites... [2, 3]. Các công nghệ in 3D đã được phát triển với các chức năng khác nhau và hướng đến mục đích ứng dụng khác nhau và được phân thành bảy nhóm sau: phun liên kết (BJ) lắng đọng năng lượng trực tiếp (DED), đùn vật liệu (ME), phun vật liệu (MJ), phản ứng tổng hợp trên nền bột (PDF), cán tấm (SL) và quang trùng hợp (VP) [4]. Trong nghiên cứu này, phương pháp in 3D FDM thuộc nhóm in ME được sử dụng để in các mẫu in trong thử nghiệm khả năng chịu nén của các cấu trúc điền đầy.

Phương pháp FDM xây dựng chi tiết theo cách bồi đắp từng lớp từ dưới lên trên, trong đó một hoặc nhiều sợi/dây tóc nhựa dẻo được nung nóng đến trạng thái nhớt và được

Abstract - This study investigates the compressive strength of five infill patterns: Grid, Rectilinear, 3D honeycomb, Triangles, and Cross, when printing 3D FDM with PLA plastic material. Test specimens were printed according to ASTM D695-15 standard to assess the compressive strength of the plastic specimens. The test specimens were adjusted for the infill density (% infill) to achieve the same mass at three levels: 1.5 g, 2.1 g, and 2.6 g, with a maximum mass difference of 1%. The results showed that, the Cross, Grid, and Triangles structures exhibited higher compressive strength compared to the 3D honeycomb and Rectilinear structures at all three mass levels. Furthermore, the ranking order of compressive strength varied when the mass of the test specimens was changed. This indicates that besides the influence of specimen mass, there are other factors affecting the compressive strength of the infill patterns, which require further in-depth research in the future.

Key words - 3D FDM printing technology; infill pattern; ASTM D695-15 standard; compressive strength; % infill

ép đùn ra khỏi đầu in một cách liên tục để hoàn thành từng lớp in. Đặc tính nhiệt dẻo của nhựa hỗ trợ quá trình kết dính các lớp in và tạo thành khối duy nhất khi nhiệt độ giảm xuống và kết thúc quá trình hóa rắn. Liên kết giữa các lớp sẽ được tạo ra do sự tương tác của các phân tử khi một lớp ở trên trong trạng thái nóng chảy và liên kết với lớp rắn bên dưới đang trong quá trình hóa rắn [5]. Một ưu điểm vượt trội của in 3D là khả năng tạo các cấu trúc điền đầy khác nhau bên trong lòng chi tiết. Tỉ lệ thể tích của cấu trúc hay vật liệu được điền đầy so với thể tích khối rắn tuyệt đối được quyết định bởi tỉ lệ điền đầy theo phần trăm. Việc tạo ra các khoảng trống bên trong chi tiết giúp làm giảm khối lượng và thời gian in mà vẫn đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật của chi tiết [6, 7].

Hiện tại nhiều phần mềm hỗ trợ in 3D như: Ultimaker Cura, Simplify3D, PrusaSlicer, Repetier-Host, Slic3r... và chúng đều có hỗ trợ in nhiều dạng cấu trúc như: Grid, Rectilinear, Concentric, Triangles, Gyroid, Honeycomb, 3D honeycomb, Cross, Octet, Cubic... [8]. Mỗi cấu trúc mang một đặc tính cơ học như độ bền (kéo, nén, uốn và va đập), cũng như khả năng hấp thụ năng lượng đánh giá qua mức độ biến dạng trong giới hạn đàn hồi là khác nhau. Tùy thuộc vào ứng dụng cụ thể, người thiết kế quyết định lựa chọn cấu trúc điền đầy cho phù hợp.

¹ The University of Danang – University of Science and Technology, Danang, Vietnam (Tran Minh Sang, Nguyen Le Minh, Tran Phuoc Thanh, Nguyen Tan Minh, Tran Van Tien, Pham Nguyen Quoc Huy)

Nhiều nghiên cứu về mối quan hệ giữa cấu trúc, thông số hình học cấu trúc, các thông số in đến khả năng chịu nén cấu trúc đã được thực hiện. Silva và cộng sự điều tra tính nén của cấu trúc khối bát diện cắt ngắn (Truncated Octahedron) và khối kim cương (Cubic Diamond) dưới ảnh hưởng của 3 yếu tố thông số hình học: kích thước cell, hình dáng cell và đường kính thanh giăng, và 2 yếu tố vận hành: vật liệu và độ dày lớp in; Kết quả cho thấy, cấu trúc bát diện cắt ngắn có tính chất cơ học tốt hơn so với mạng kim cương khối [9]. Kết quả tương đồng cũng được công bố trong các nghiên cứu của Admadi và Yue [10-12]. Zhang và cộng sự điều tra tính nén và hấp thụ năng lượng của cấu trúc lập phương tâm diện (Face-centered cubic) và cấu trúc tổ ong (Honeycomb), cho thấy khả năng chịu nén của cấu trúc lập phương chịu ảnh hưởng lớn bởi hình dạng của thanh giăng và góc liên kết. Trong khi đó, các cấu trúc tổ ong biên thể chịu nén cao hơn cấu trúc tổ ong truyền thống [13]. Cấu trúc Grid và cấu trúc tổ ong Re-entrant có khả năng chịu nén tương đồng, nhưng cấu trúc Grid lại có khả năng chịu uốn kém [14]. Thử nghiệm và dự đoán hành vi chịu nén và kéo của cấu trúc Triangles với vật liệu PLA được thực hiện bởi Brischetto và cộng sự [15]. Baig và cộng sự đã so sánh khả năng chịu nén của 3 cấu trúc Hexagonal, Triangular, và Linear tại 3 mức điền đầy (25%, 50% và 100%), kết quả cho thấy khả năng chịu nén đều giảm dần theo thứ tự: Hexagonal, Linear và Triangular [16]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu của Pernet, khi xét khả năng chịu nén của Triangular, Linear và Hexagonal lại có sự thay đổi tùy theo phần trăm điền đầy tại 20, 40, 60, 80 và 100%. Đồng thời, tuy có sự thay đổi tính kháng nén theo % điền đầy nhưng vẫn cho thấy một nhóm các cấu trúc có tính nén cao như: Grid, Triangles, Cross, Lines [17]. Một nghiên cứu khác khi nghiên cứu về tính nén thì xếp hạng theo thứ tự giảm dần của Grid, Triangles, Tri-hexagon, cuối cùng là quarter cubic tại 60% [18]. Theo nghiên cứu của Subeshan, độ bền nén của 5 cấu trúc Solid, Diamond, Hexagonal, Square, Triangles sẽ có thay đổi tại các mức điền đầy (20%, 40%, 60%, 80%) [19]. Khi so sánh tại 20, 30 và 40% tỉ lệ điền đầy, cấu trúc Honeycomb có độ bền nén cao hơn Rectangular... [20].

Ở các nghiên cứu trên, các cấu trúc được in tại các mức tỉ lệ điền đầy khác nhau cũng cho kết quả khả năng kháng nén khác nhau. Mặt khác, cùng nghiên cứu về các cấu trúc như nhau và được in ở cùng mức điền đầy nhưng có kết luận khác nhau về khả năng kháng nén của chúng. Mặt khác, kết quả cân mẫu trong nghiên cứu của Pernet cho thấy sai lệch khối lượng khi in mẫu cùng tỉ lệ điền đầy lên đến 11,99% so với khối lượng trung bình, nếu xét riêng sai lệch khối lượng của 2 mẫu in có khối lượng lớn nhất và bé nhất trong loạt mẫu in cho thấy chênh lệch lên đến 23% [17]. Điều này được sự đoán là nguyên nhân chính dẫn đến sự sai khác về kết quả kháng nén trong các nghiên cứu trước.

Để có kết luận về sự khác biệt khối lượng mẫu khi in cùng mức tỉ lệ điền đầy, nhóm tác giả đã thực hiện in các mẫu có cùng: kích thước, loại vật liệu, thông số in, và mức % infill nhưng có cấu trúc điền đầy khác nhau. Kết quả cân mẫu cho thấy, khối lượng thu được là khác nhau. Khi khác nhau về khối lượng, chứng tỏ thể tích điền đầy của các cấu trúc trong chi tiết là khác nhau, dẫn đến kết quả

phép đo nén khác nhau.

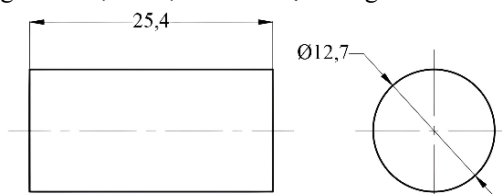
Trong nghiên cứu này, vật liệu PLA được lựa chọn để in các cấu trúc điền đầy với các lý do sau: (1) ứng dụng của PLA trong thực tiễn rất đa dạng: ô tô, hàng không, kỹ thuật y sinh và mô nhân tạo, ứng dụng làm cấu trúc nền trong thiết bị dẫn điện, ứng dụng làm cảm biến, ứng dụng làm điện cực trong sản xuất pin... [21]; (2) PLA cũng được xếp vào nhóm có tính kháng nén cao cùng với ABS, PETG, Nylon, PEEK, và PLA cũng là vật liệu dễ in nhất và thường được sử dụng trong nghiên cứu tính kháng nén khi in 3D FDM [17, 19]. Để giới hạn phạm vi nghiên cứu cơ tính của cấu trúc khi in 3D, chỉ tính kháng được lựa chọn để điều tra. 05 cấu trúc điền đầy gồm Grid, Rectilinear, 3D honeycomb, Triangles và Cross được thực nghiệm in ở cùng các mức khối lượng bằng cách hiệu chỉnh tỉ lệ điền đầy. Các mẫu cấu trúc in có cùng kích thước tiêu chuẩn sẽ được đo và so sánh khả năng kháng nén. Kết quả của bài báo giúp các nhà nghiên cứu có cái nhìn mới về ảnh hưởng của khối lượng mẫu trong nghiên cứu cơ tính của các cấu trúc điền đầy khi in 3D FDM, khi dựa vào tỉ lệ điền đầy để so sánh tính kháng nén.

2. Phương pháp

2.1. Kích thước mẫu thử, vật liệu và thông số in

2.1.1. Kích thước mẫu

Kích thước mẫu thử dựa trên tiêu chuẩn ASTM D695-15, đây là tiêu chuẩn trong thử nghiệm đặc tính nén của vật liệu nhựa [22]. Mẫu nén dạng hình trụ dài 25,4 mm và đường kính 12,7 mm, như thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Kích thước mẫu thử nén theo tiêu chuẩn ASTM D695-15

2.1.2. Thông số vật liệu

Vật liệu được sử dụng là nhựa PLA màu trắng, thông số vật liệu được trình bày chi tiết trong Bảng 1 [23].

Bảng 1. Thông số vật liệu sợi nhựa in PLA

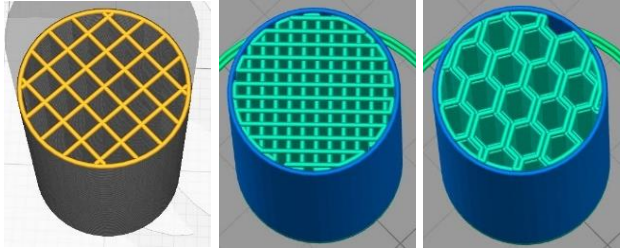
Đặc tính	Giá trị	Đặc tính	Giá trị
Khối lượng riêng	1,2 g/cm ³	Bền va đập	5,4 kJ/m ²
Độ bền kéo	≥ 50 MPa	Độ cứng thang Shore	88 Sh D
Độ giãn dài	11,2 %	Nhiệt chuyển đổi thủy tinh	60 ÷ 65°C
Modul đàn hồi	1913 MPa	Điểm nóng chảy	175 ÷ 180°C
Bền uốn	91 MPa	Hấp thụ nước	0,2 ÷ 0,4 %

2.1.3. Thông số in

Mẫu thử nén được mô hình hoá trên phần mềm Solidworks, sau đó lưu file mô hình dưới định dạng *.STL. File này được mở bởi phần mềm hỗ trợ in là 3D Ultimaker Cura phiên bản 4.5.0 để hỗ trợ in các mẫu: Grid, Triangles và Cross, trong khi đó cấu trúc Rectilinear và 3D honeycomb được hỗ trợ in bởi phần mềm Simplify 3D. Thông số in được thiết lập giống nhau trên hai phần mềm và được trình bày trong Bảng 2. Máy in sử dụng là loại 3D Reprap Prusa i3.

Bảng 2. Thông số cài đặt trên máy in

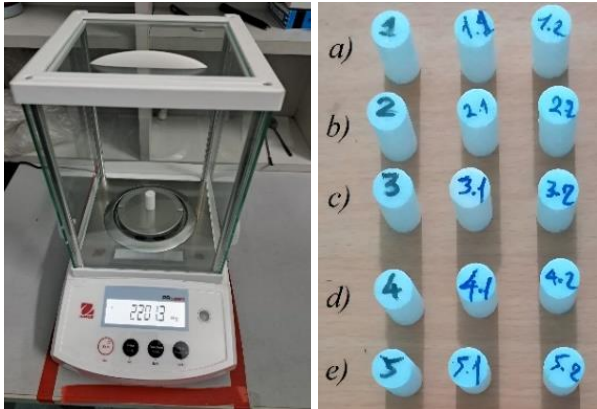
Đặc tính	Giá trị	Đặc tính	Giá trị
Đường kính lỗ đầu đùn nhựa	0,4 mm	Mật độ điền đầy	Hiệu chỉnh
Đường kính sợi nhựa	1,75 mm	Cấu trúc in	Hiệu chỉnh
Chiều cao lớp in	0,1 mm	Nhiệt độ đùn nhựa	190°C
Độ dày thành ngoài	0,4 mm	Nhiệt độ bàn in	50°C
Độ dày lớp trên/dưới	0,6 mm	Tốc độ in	50 mm/s
Số lớp đáy trên/dưới	6	Số lớp tường	1



a) Grid b) Rectilinear c) 3D honeycomb



d) Triangles e) Cross

Hình 2. Các dạng cấu trúc in trong chi tiết**Hình 3.** Cân mẫu để hiệu chỉnh khối lượng khi in trên thiết bị PR224/E Ohaus và mẫu thử sau khi in. a) Grid, b) Rectilinear, c) 3D honeycomb, d) Triangles, e) Cross

Tỉ lệ điền đầy sẽ được thực nghiệm in và cân hiệu chỉnh để các mẫu in đạt được khối lượng lần lượt tại 3 mức: 1,5 g; 2,1 g; và 2,6 g. Có thể quan sát hình dạng khác nhau của các cấu trúc điền đầy bên trong mẫu tại Hình 2 lần lượt là: Grid, Rectilinear, 3D honeycomb, Triangles và Cross, khi được trích xuất từ phần mềm Cura và Simplify 3D. Mỗi cấu trúc in ứng với mỗi mức khối lượng cụ thể sẽ được in lặp lại 3 mẫu. Hình 3 thể hiện quá trình cân mẫu trên thiết bị cân phân tích PR224/E Ohaus với độ đọc lên đến 0,1 mg và các mẫu thử nén sau khi được in.

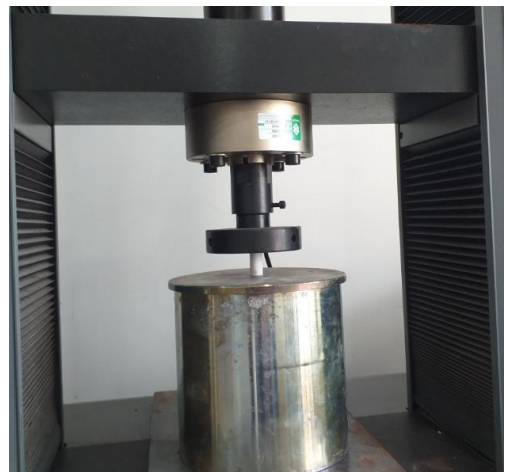
2.2. Cài đặt thử nén

Thử nghiệm nén dọc trục được tiến hành để xác định độ bền nén tĩnh của các mẫu cấu trúc in. Máy được sử dụng

để đo bền nén là máy kéo nén vạn năng WDW-100E với đặc điểm kỹ thuật được trình bày trong Bảng 3 [24]. Lực nén được áp dụng vuông góc với các lớp in của mẫu. Tốc độ của lực tác dụng được cài đặt 2 mm/phút. Các thí nghiệm được tiến hành ở nhiệt độ phòng (27°C). Ba mẫu cho mỗi cấu trúc sẽ được thử nén, sau đó giá trị trung bình lực tác động lớn nhất được sử dụng để phân tích. Việc cài đặt mẫu đo lên máy và thử nén được thể hiện trong Hình 4.

Bảng 3. Thông số kỹ thuật chính của WDW-100E

Đặc tính	Giá trị	Đặc tính	Giá trị
Khả năng tải	100 kN	Độ phân giải dịch chuyển chuyên	0,01 mm
Độ chính xác tải	$\pm 0,25\%$	Phạm vi tốc độ	0,05÷500mm/ph
Độ phân giải biến dạng	0,04 μm	Độ phân giải tải	1/300000

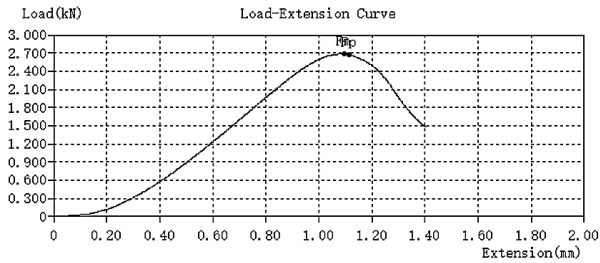
**Hình 4.** Mẫu trong quá trình kiểm tra nén

Việc phân tích kháng nén thông thường dựa vào đồ thị ứng suất-biến dạng, tuy nhiên diện tích mặt cắt ngang của mỗi mẫu cấu trúc là không giống nhau (tham khảo Hình 2). Do đó, không thể lấy diện tích mặt cắt ngang để làm thông số cố định cho việc tính toán ứng suất chịu nén của mẫu. Trong trường hợp này, giá trị lực nén lớn nhất lên mỗi mẫu thử được sử dụng để phân tích khả năng kháng nén của mẫu.

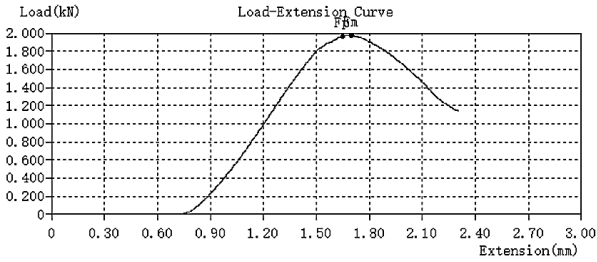
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả đo khả năng chịu nén

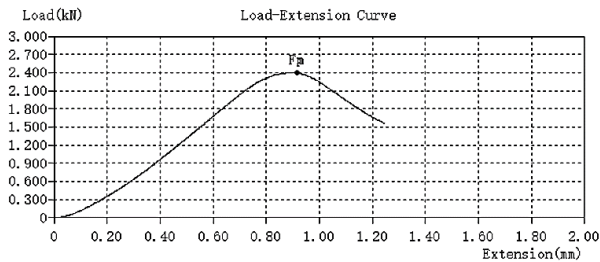
Trong nghiên cứu, 5 mẫu cấu trúc được sử dụng là: Grid, Rectilinear, 3D honeycomb, Triangles và Cross. Mỗi mẫu cấu trúc được in và cân khối lượng để hiệu chỉnh tương ứng đạt được 3 mức khối lượng lần lượt là: 1,5 g, 2,1 g và 2,6 g. Tuy đã hiệu chỉnh về tỉ lệ điền đầy để khối lượng mẫu là như nhau, nhưng do ảnh hưởng của nhiều yếu tố trong quá trình in nên không thể đảm bảo tuyệt đối chính xác về khối lượng. Do đó, sai lệch khối lượng được giới hạn trong mức thấp hơn 1%. Ứng với mỗi mức khối lượng, mỗi cấu trúc được in lặp lại 3 lần. Do đó, tổng số mẫu cho một mức khối lượng là 15 mẫu, và 45 mẫu tính cho 3 mức khối lượng. Hình 5 thể hiện đồ thị quan hệ giữa lực nén và hành trình nén được xuất ra từ máy đo sau khi đo nén của các mẫu thử tại 1,5 g. Bảng 4 thể hiện tổng hợp kết quả đo lực nén tối đa của 45 mẫu, giá trị lực nén trung bình sẽ được sử dụng trong phân tích.



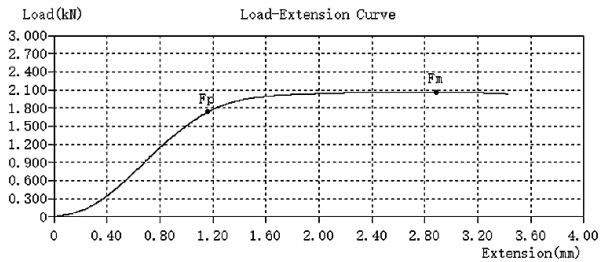
a. Grid



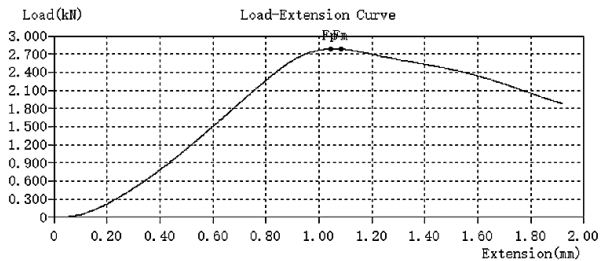
b. Rectilinear



c. Triangles



d. 3D honeycomb



e. Cross

Hình 5. Đồ thị quan hệ lực nén – hành trình nén của các mẫu nén tại 1,5 g

Từ Hình 5, đồ thị lực nén - hành trình cho thấy, sự khác nhau về đặc tính kháng nén và khả năng biến dạng đàn hồi của các cấu trúc. Xu hướng biến dạng khi nén được mô tả như sau: khi đầu nén của máy đo tiếp xúc vào mẫu thử thì lực nén bắt đầu tăng, đồng thời mẫu thử bắt đầu biến dạng trong giới hạn đàn hồi của chúng; khi lực nén tăng đến khi cấu trúc gặp ngưỡng đàn hồi, cấu trúc

xảy ra hiện tượng thành và vách bị gập, khả năng kháng nén bị giảm đi; do đặc tính dẻo vật liệu nhựa cao nên nếu tiếp tục tăng hành trình ép thì mẫu thử sẽ bị ép lại thành khối đặc và lúc này lực cản nén lại tăng lên. Tuy nhiên, tính kháng nén chỉ được tính trong giới hạn đàn hồi của cấu trúc, nếu cấu trúc biến dạng vượt quá giới hạn này thì không có khả năng phục hồi hình dáng ban đầu được nữa. Khi so sánh khả năng biến dạng đàn hồi của các cấu trúc trong Hình 5, độ lớn hành trình biến dạng xếp theo thứ tự tăng dần: Cross, Triangles, Rectilinear, Grid và 3D honeycomb tương ứng với hành trình 0,48 mm, 0,9 mm, 0,94 mm, 1, 04 mm và 2,87 mm. Trong đó, đồ thị lực nén - hành trình của mẫu 3D honeycomb (Hình 5d) có sự khác biệt lớn. Nguyên nhân là do khả năng biến dạng đàn hồi của cấu trúc này lớn, nên khi cấu trúc này chưa đạt đến ngưỡng biến dạng đàn hồi thì mẫu thử gần như đã bị nén lại tối đa và duy trì trong một đoạn hành trình nhất định, đến khi nó bị ép đặc hoàn toàn thì lực nén sẽ bắt đầu tăng lên giống như nén mẫu đặc thông thường.

Bảng 4. Kết quả đo lực nén tối đa theo các mức khối lượng

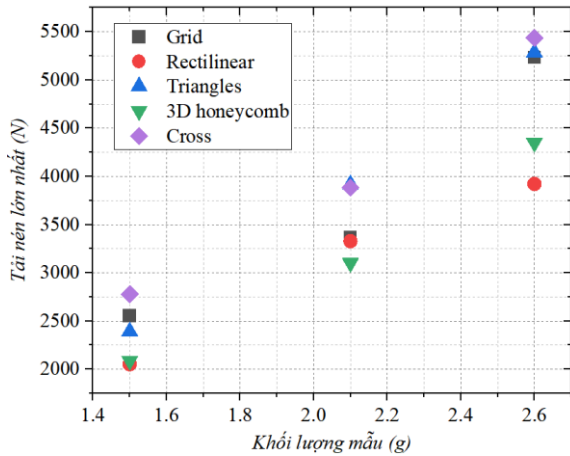
Mức khối lượng	Dạng cấu trúc	Lực nén tối đa (N)			Trung bình (N)	Xếp hạng
		Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3		
1,5 g	Grid	2450	2685	2525	2553	2
	Rectilinear	1975	2220	1960	2052	5
	3D honeycomb	2105	2090	2070	2088	4
	Triangles	2395	2375	2405	2392	3
	Cross	2815	2785	2740	2780	1
2,1 g	Grid	3315	3430	3345	3363	3
	Rectilinear	3195	3450	3340	3328	4
	3D honeycomb	3295	2945	3070	3103	5
	Triangles	4015	3885	3855	3918	1
	Cross	3815	3870	3965	3883	2
2,6 g	Grid	5205	5330	5165	5233	3
	Rectilinear	3810	3920	4035	3922	5
	3D honeycomb	4280	4355	4415	4350	4
	Triangles	5370	5145	5340	5285	2
	Cross	5445	5470	5390	5435	1

3.2. So sánh khả năng chịu nén

Do hiệu chỉnh cân bằng về cùng khối lượng nên kết quả đo đảm bảo tính đồng nhất về điều kiện đo. Kết quả thu được đảm bảo độ tin cậy cao hơn so với việc in và đo mẫu dưới điều kiện giống nhau về tỉ lệ điền đầy nhưng khác nhau về khối lượng mẫu thử. Hình 6 là biểu đồ thể hiện khả năng kháng nén của 05 mẫu cấu trúc tại 03 mức khối lượng lần lượt: 1,5 g, 2,1 g và 2,6 g.

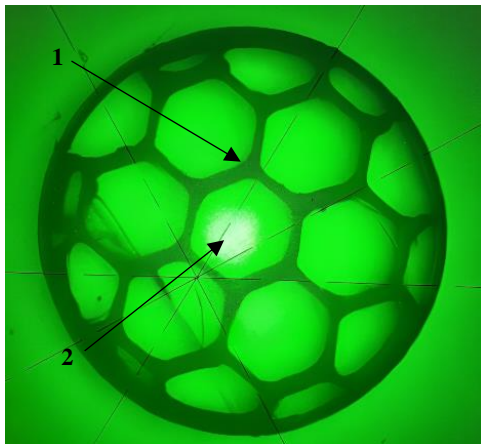
Từ Hình 6 ta thấy, khả năng chịu nén của các cấu trúc tại mức khối lượng 1,5 g giảm dần theo thứ tự: Cross, Grid, Triangles, 3D honeycomb, và Rectilinear. Tại mức 2,1 g, khả năng kháng nén giảm dần từ: Triangles, Cross, Grid, Rectilinear, và 3D honeycomb. Tương tự, mức giảm dần tính nén theo thứ tự: Cross, Triangles, Grid, 3D honeycomb, và Rectilinear tại mức khối lượng 2,6 g. Từ kết quả cho thấy xu hướng chung là khả năng kháng nén của các cấu trúc đều tăng khi thay đổi khối lượng mẫu thử qua 3 mức. Tại mức 2,1 g, có sự tách nhóm về tính kháng

nén của Triangles và Cross. Tại mức 2,6 g, cấu trúc Cross, Triangles và Grid thể hiện tính kháng nén vượt trội. Chúng ta có thể xếp các cấu trúc Cross, Triangles và Grid vào nhóm có tính kháng nén cao; nhóm có tính kháng nén thấp hơn gồm cấu trúc 3D honeycomb và Rectilinear.



Hình 6. Biểu đồ so sánh khả năng chịu nén của 5 mẫu tại 3 mức khối lượng khác nhau

Việc thay đổi xếp hạng chịu nén của các cấu trúc tại các mức khối lượng cho thấy, có sự tác động của nhiều yếu tố khác ngoài yếu tố ổn định về khối lượng. Nếu coi các yếu tố như: thể tích vật liệu (được in ở cùng khối lượng), loại vật liệu (cùng là PLA), và tham số cài đặt máy in (cài đặt chung như Bảng 2) vào nhóm ít tác động, thì các yếu tố ảnh hưởng khác có thể liệt kê như: cấu trúc in, kích thước mẫu nén, khả năng liên kết giữa các lớp... Khi khối lượng tăng thì bề dày thành/vách của các cấu trúc in cũng đồng loạt tăng lên, liên kết tại các nút (nơi gặp nhau giữa các sợi nhựa trong cùng một lớp) cũng có thay đổi kích thước, dẫn đến tác động đến khả năng chịu nén của từng loại cấu trúc. Trong quá trình in, việc sợi nhựa được đun dưới dạng nóng chảy và sau đó đông rắn, trong quá trình này rất khó để điều khiển độ rộng thành/vách của các mẫu thử là tuyệt đối giống nhau. Ví dụ, khi cắt mẫu Honeycomb và đo chiều dày vách của mẫu này trên máy chiếu biên dạng TESA-SCOPE 300V Vertical Profile Projector như trong Hình 7; qua đo đạc độ dày vách tại 1 và 2 cho kết quả: vách 1 dày 0,44 mm và vách 2 chỉ dày 0,28 mm. Mặt khác, kích thước tại các nút giao nhau giữa các vách và vách với thành bao ngoài cũng khác.



Hình 7. Kiểm tra chiều dày vách cấu trúc Honeycomb

Ngoài ra, giữa các lớp nhựa in khi chúng liên kết với nhau cũng không thể đảm bảo thể tích liên kết lớp trên với lớp dưới là giống nhau cho tất cả các lớp. Mà sự thay đổi chiều dày thành/vách, kích thước liên kết sợi nhựa tại các nút giao nhau, cũng như thể tích nhựa liên kết qua các lớp như đề cập bên trên có ảnh hưởng rất lớn đến tính kháng nén của từng cấu trúc. Đó có thể là các nguyên nhân làm thay đổi xếp hạng khả năng kháng nén tại các mức khối lượng khác nhau, và cần có thêm các nghiên cứu trong thời gian tới để làm rõ sự tác động của chúng.

4. Kết luận

Bài báo điều tra kháng nén của 05 cấu trúc điển hình: Grid, Rectilinear, 3D honeycomb, Triangles và Cross khi in 3D FDM. Yêu cầu các mẫu thử có khối lượng giống nhau tại 03 mức 1,5 g; 2,1 g và 2,6 g và sai khác khối lượng mỗi mức không quá 1%. Kết quả, khi tăng khối lượng vật liệu điển hình thì tính kháng nén của 05 cấu trúc đều tăng lên đúng theo quy luật quan hệ giữa mức khối lượng mẫu tăng và tính kháng nén của cấu trúc mẫu cũng tăng. Tuy nhiên, thứ tự xếp hạng tính kháng nén của 05 mẫu có sự thay đổi qua 03 mức khối lượng và mức độ biến động phụ thuộc vào từng cấu trúc. Điều này góp phần giải thích nguyên nhân có sự khai khác xếp hạng tính kháng nén trong các nghiên cứu đã công bố khi chỉ dựa vào tỉ lệ điều chỉnh nhưng có sự sai lệch khối lượng mẫu. Nghiên cứu này cũng đã phát hiện ngoài nguyên nhân lệch khối lượng, thì cũng dự đoán tồn tại nguyên nhân khác giải thích cho biến động xếp hạng khả năng kháng nén do: chiều dày vách các cấu trúc không đều, mức độ liên kết vách và thành không đồng nhất. Do đó, việc tối ưu hoá thông số vận hành in để khắc phục các nguyên nhân gây biến động xếp hạng kháng nén tương ứng với từng cấu trúc sẽ được thực hiện trong thời gian tới.

Danh mục từ viết tắt

PLA	Polylactic acid
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
PETG	Polyethylene terephthalate glycol
PEEK	Polyetheretherketone
ASTM	Hiệp hội thí nghiệm và vật liệu Hoa Kỳ
D695-15	Phương pháp thử nghiệm để xác định các tính chất cơ học của nhựa
FDM	Fused deposition modeling
BJ	Binding jetting
DED	Directed energy deposition
ME	Material extrusion
MJ	Material jetting
PBF	Powder bed fusion
SL	Sheet lamination
VP	Vat photopolymerization

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số T2023-02-23.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. J. P. M. Ramlan, "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications", *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286-1296,

2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
- [2] J. Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials", *Applied materials today*, vol. 7, pp. 120-133, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>.
- [3] Z. X. Low, Y. T. Chua, B. M. Ray, D. Mattia, I. S. Metcalfe, and D. A. Patterson, "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques", *Journal of membrane science*, vol. 523, pp. 596-613, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.006>.
- [4] M. M. Prabhakar, A. Saravanan, A. H. Lenin, K. Mayandi, and P. S. Ramalingam, "A short review on 3D printing methods, process parameters and materials", *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, part 7, pp. 6108-6114, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.225>.
- [5] D. Syrlybayev, B. Zharylkassyn, A. Seisekulova, M. Akhmetov, A. Perveen, and D. J. P. Talamona, "Optimisation of strength properties of FDM printed parts-A critical review", *Polymers*, vol. 13, no. 10, p. 1587, 2021. doi: 10.3390/polym13101587.
- [6] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, A. Conejero, "Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing", *3D printing and additive manufacturing*, vol. 3, no. 3, pp. 183-192, 2016. DOI:10.1089/3dp.2015.0036.
- [7] I. Bogrekcı, P. Demircioglu, H. S. Sucuoglu, and O. Turhanlar, "The effect of the infill type and density on hardness of 3D printed parts", *International journal of 3d printing technologies and digital industry*, vol. 3, no. 3, pp. 212-219, 2019.
- [8] M. M. Ariffin, N. Sukindar, B. H. Baharudin, C. N. A. Jaafar, and M. I. S. Ismail, "Slicer method comparison using open-source 3D printer", in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 114, no. 1, p. 012018, 2018. DOI 10.1088/1755-1315/114/1/012018
- [9] R. Guerra Silva, C. Salinas Estay, G. Morales Pavez, J. Zahr Viñuela, and J. M. Torres, "Influence of geometric and manufacturing parameters on the compressive behavior of 3D printed polymer lattice structures", *Materials*, vol. 14, no. 6, p. 1462, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14061462>.
- [10] S. M. Ahmadi *et al.*, "Additively manufactured open-cell porous biomaterials made from six different space-filling unit cells: The mechanical and morphological properties", *Materials*, vol. 8, no. 4, pp. 1871-1896, 2015. doi: 10.3390/ma8041871.
- [11] S. Ahmadi *et al.*, "Mechanical behavior of regular open-cell porous biomaterials made of diamond lattice unit cells", *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 34, pp. 106-115, 2014. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2014.02.003
- [12] X. Z. Yue, K. Matsuo, and K. Kitazono, "Compressive behavior of open-cell titanium foams with different unit cell geometries", *Materials Transactions*, vol. 58, no. 11, pp. 1587-1592, 2017. <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-M2017834>.
- [13] C. Zhang, T. Li, Q. Deng, and X. Li, "Compression Behavior of 3D Printed Polymer TPU Cubic Lattice Structure", *Materials Research*, vol. 25, no. 4, 2022. DOI:10.1590/1980-5373-mr-2022-0060.
- [14] S. A. M. Ghannadpour, M. Mahmoudi, and K. H. Nedjad, "Structural behavior of 3D-printed sandwich beams with strut-based lattice core: Experimental and numerical study", *Composite Structures*, vol. 281, p. 115113, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115113>.
- [15] S. Brischetto and R. Torre, "Tensile and compressive behavior in the experimental tests for PLA specimens produced via fused deposition modelling technique", *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 3, p. 140, 2020. <https://doi.org/10.3390/jcs4030140>.
- [16] A. M. Baig, K. M. Moeed, and M. S. Haque, "A study on the effect of infill percentage and infill pattern on the compressive behaviour of the FDM printed polylactic acid (PLA) polymer", *Global Research and Development Journal for Engineering*, vol. 4, no. 9, pp. 5-8, 2019.
- [17] B. Pernet, J. K. Nagel, and H. Zhang, "Compressive strength assessment of 3D printing infill patterns", *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 682-687, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.114>.
- [18] B. Aloyaydi, S. Sivasankaran, and A. Mustafa, "Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid", *Polymer Testing*, vol. 87, p. 106557, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106557>.
- [19] B. Subeshan, A. Alonayni, M. M. Rahman, and E. Asmatulu, "Investigating compression strengths of 3D printed polymeric infill specimens of various geometries", *Nano-, Bio-, Info-Tech Sensors, and 3D Systems II 2018*, vol. 10597, pp. 89-94, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2296651>.
- [20] G. Domínguez-Rodríguez, J. J. Ku-Herrera, and A. Hernández-Pérez, "An assessment of the effect of printing orientation, density, and filler pattern on the compressive performance of 3D printed ABS structures by fuse deposition", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 95, pp. 1685-1695, 2018.
- [21] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review", *Advanced drug delivery reviews*, vol. 107, pp. 367-392, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
- [22] D20 Committee, "Test method for compressive properties of rigid plastics", *ASTM International*, vol. 10, 2010.
- [23] L. Shenzhen Qipang Technology Co., "3D Printer PLA Filament", *Kingroom*, [Online]. Available: <https://kingroom.com/collections/3d-printer-pla-filament>, [Accessed 29-10-2023].
- [24] HTS Group, "100KN Computer Control Electronic Universal Testing Machine", *Emin*, [Online]. Available: <https://emin.vn/>, [Accessed 29/10/2023].