

KHẢO SÁT SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA CẤU TRÚC LƯỚI TỚI CƠ TÍNH CỦA KẾT CẤU IN 3D SỬ DỤNG NHỰA PHÂN HỦY SINH HỌC POLYLACTIC ACID

THE EFFECT OF LATTICES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF 3D PRINTED STRUCTURES BASED POLYLACTIC ACID BIODEGRADABLE PLASTIC

Hoàng Tiến Dũng¹,
Nguyễn Hữu Phấn¹, Hoàng Tiến Đạt^{2,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.021>

TÓM TẮT

Bài báo này khảo sát sự ảnh hưởng của các cấu trúc lưới tới cơ tính của các kết cấu in 3D sử dụng vật liệu Polylactic Acid (PLA) thân thiện môi trường. Nghiên cứu sử dụng mẫu hình khối lập phương có kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm làm mô hình thử nghiệm với ba dạng cấu trúc khác nhau. Các cấu trúc lưới điển hình bao gồm lưới tam giác với góc đan ($-30/30$), lưới vuông với góc đan ($0/90$) và lưới vuông có góc đan ($-45/45$). Cơ tính của các mô hình sẽ được dự đoán qua mô phỏng và được kiểm chứng bởi thực nghiệm với độ tin cậy cao. Kết quả nghiên cứu cho thấy mẫu lưới tam giác có cơ tính vượt trội hơn so với các mẫu còn lại khi các gân kết nối và phân bố lực tốt hơn. Nghiên cứu chỉ ra cấu trúc lưới in là một yếu tố rất quan trọng có ảnh hưởng lớn đến cơ tính của các kết cấu in 3D.

Từ khóa: Công nghệ in 3D; cấu trúc in; nhựa nhiệt dẻo; phần tử hữu hạn; cơ tính vật liệu in 3D.

ABSTRACT

This paper investigates the influence of lattice structures on the mechanical properties of 3D-printed structures using Polylactic Acid (PLA) biodegradable plastic. The study utilizes a cubic model with dimensions of $50 \times 50 \times 50$ mm as the test model, featuring three different lattice structure types. The typical lattice structures include a triangular lattice with an inclination angle of ($-30/30$), a square lattice with an inclination angle of ($0/90$), and a square lattice with an inclination angle of ($-45/45$). The mechanical properties of these models are predicted through simulations and validated with high reliability through experiments. The research results indicate that the triangular lattice pattern exhibits superior mechanical properties compared to the other patterns, attributed to better connectivity and force distribution among the struts. The study underscores the significance of lattice structure in 3D printing as a critical factor significantly influencing the mechanical properties of 3D-printed structures.

Keywords: 3D printing; printing lattice; thermoplastic; finite element method; mechanical properties of 3D printed material.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên

*Email: hoangdat@tnut.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/5/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

1. GIỚI THIỆU

In 3D, thường được gọi là công nghệ sản xuất bồi đắp, là quy trình sản xuất tiên tiến cho phép tạo ra các đối tượng phức tạp với độ chính xác và tính thích ứng cực kỳ cao trong một lần gia công. Nhiều ngành công nghiệp, bao gồm hàng không vũ trụ, y tế, ô tô và gia công phụ trợ, tạo mẫu nhanh đã sử dụng công nghệ rộng rãi những năm gần đây. Chất lượng và độ bền cơ học của các chi tiết in 3D dựa phần lớn vào cấu trúc lưới in [1]. Một cấu trúc lưới thông thường được tạo bởi các đường gân nối tạo với nhau thành một mạng kết cấu rỗng bên trong chi tiết in. Các nhà nghiên cứu và chuyên gia trong ngành công nghiệp đã chú ý đặc biệt đến cấu trúc lưới khi chúng có khả năng cải thiện cả tính năng của các sản phẩm in 3D. So với các kết cấu đặc của các chi tiết sản xuất truyền thống, cấu trúc lưới in 3D giúp chi tiết in có trọng lượng nhẹ, khả năng hấp thụ năng lượng và trao đổi nhiệt tốt hơn. Hơn nữa, bằng cách điều chỉnh tối ưu hình học, có thể tạo ra các cấu trúc lưới không những có đặc tính cơ học mà còn có khả năng giảm chấn. Một số các mẫu lưới, bao gồm các mẫu lưới thông thường như lưới hình lập phương, lưới hình tứ diện và lưới hình bát diện, lưới tổ ong, lưới ngẫu nhiên và các mẫu lưới mô phỏng theo cấu trúc tự nhiên, có thể được sử dụng trong quá trình in 3D [2]. Các đặc điểm của vật liệu, thông số công nghệ in (như độ dày lớp in, tỉ lệ rỗng, nhiệt độ và tốc độ in) và các phương pháp xử lý sau in (như gia nhiệt hoặc đánh bóng bề mặt) đều ảnh hưởng đến chất lượng cấu trúc lưới [3]. Do đó, ngoài việc phát triển các phương pháp phân tích và phương pháp số để khảo sát chất lượng thiết kế cấu trúc lưới, việc xác định ảnh hưởng của các loại các cấu trúc lưới được tạo ra bằng các phương pháp in 3D khác nhau như in mẫu chảy (FDM), chiếu xạ polymer hóa (SLA), kỹ thuật in phun, và thiêu kết laser chọn lọc (SLS) hiện đang là một chủ đề nghiên cứu rất thiết thực. Trong đó, công nghệ FDM với độ chính xác và chi phí in phù hợp đã được sử dụng phổ biến nhất để tạo cấu trúc lưới đa dạng và linh hoạt trong nhiều ứng dụng.

Một vài nghiên cứu gần đây đã khảo sát ứng xử nén của các khối hình lập phương được tạo ra bởi công nghệ

FDM và chỉ ra ảnh hưởng của kích thước lưới in tới cơ tính của khối in [4]. Các tác động của các được gân dọc, gân ngang, kích thước gân được chỉ ra. Tương tự, cấu trúc lưới cơ sở hình lập phương cũng đã được in thử và kiểm tra [5]. Kết quả của các thử nghiệm nén cho thấy những cấu trúc không đồng đều cũng làm giảm đặc tính cơ học của chi tiết in 3D từ polymer. Một số nghiên cứu khác cũng chỉ ra ảnh hưởng của kích thước mắt lưới, hình dạng và diện tích mặt cắt lưới, các sắp xếp ô lưới và kích thước bo tròn góc lưới đối với ứng xử cơ học của các cấu trúc in [6, 7]. Tác động của các biến và tương tác của chúng đã được dự đoán thông qua các bài thiết kế thí nghiệm, và cho thấy rằng độ dày gân và chiều rộng ô lưới có tác động lớn nhất đến khả năng chịu áp lực, khả năng hấp thụ năng lượng và ứng xử nén của nhiều cấu trúc lưới nhỏ được tạo ra bằng phương pháp FDM. Nhiều nghiên cứu khác cũng đã nghiên cứu cách dự đoán ảnh hưởng của sự không đều trong các gân lưới có thể ảnh hưởng đến đặc tính cơ học của các lưới [8]. Tuy nhiên, nghiên cứu dự đoán độ cứng của cấu trúc với các lưới in khác nhau được sản xuất bằng FDM và sợi carbon liên tục còn đang khá hiếm. Nghiên cứu này khi được triển khai rộng hơn có thể giúp người thiết kế giảm thiểu việc in lỗi, giảm chi phí và cải thiện chất lượng của các sản phẩm in 3D.

Trong bài báo này, cơ tính của hai dạng mẫu in khác nhau với các cấu trúc lưới và vật liệu khác nhau được dự đoán và kiểm chứng thông qua thí nghiệm kéo, nén. Phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng để tính toán và mô phỏng sáu mô hình in 3D sử dụng vật liệu PLA, PLA kết hợp với sợi carbon liên tục. Trong mỗi dạng mẫu nghiên cứu, ba cấu trúc lưới bao gồm lưới đặc line (0/0), tam giác (-30/30), line (0/90) và line (-45/45) được khảo sát. Dựa theo các thông số công nghệ in, các mô hình 3D kết cấu in được thiết kế tái tạo lại phục vụ quá trình mô phỏng bằng phần mềm Abaqus. Kết quả cho thấy cấu trúc lưới có ảnh hưởng lớn đến độ cứng của mẫu in. Hơn nữa, cấu trúc lưới được in bằng sợi carbon liên tục đã cải thiện đáng kể độ cứng của cấu trúc in. Điều này, giúp mở rộng ứng dụng của kỹ thuật in FDM không chỉ cho việc tạo mẫu nguyên mẫu mà còn cho việc tạo các sản phẩm có tính ứng dụng thật.

2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Thông số vật liệu và công nghệ in

Ở bài báo này, mô hình khối lập phương có kích thước 50 × 50 × 50mm thiết kế bởi phần mềm Solidworks và được sử dụng cho mô hình mô phỏng. Phần mềm Cura của Công ty Ultimake đã được sử dụng để chia lớp in và tạo ra các mẫu cấu trúc lưới khác nhau dựa trên các thông số công nghệ in cài đặt. Phần mềm này có thể mô phỏng và hiển thị mô hình in giống như mô hình sản phẩm thực tế. Do đó, dựa trên kết quả mô phỏng từ Cura, mô hình 3D sẽ được thiết kế lại bằng Solidworks nhằm tạo ra mô hình 3D cho quá trình mô phỏng kiểm tra cơ tính trên phần mềm Abaqus. Vật liệu PLA của hãng ESUN được sử dụng cho cả mô phỏng và thí nghiệm có đặc tính thể hiện trong bảng 1. Các thông số công nghệ in chính cài đặt trên Cura được liệt kê như trong bảng 2.

Bảng 1. Thông số vật liệu PLA

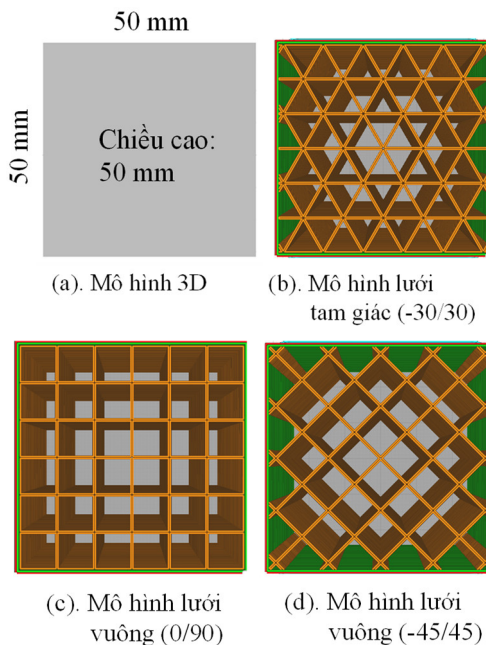
Vật liệu	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Trọng lượng riêng (g/cm ³)	Độ giãn tới hạn (%)	Độ bền kéo (MPa)
PLA - ESUN	2,69	0,35	1,24	12	35

Bảng 2. Thông số công nghệ in

Chiều dày lớp in (mm)	Tốc độ in (mm/s)	Nhiệt độ in (°C)	Nhiệt độ bàn in (°C)	Chiều rộng đường in (mm)	Phần trăm điển đầy (%)	Số lớp in ngoài vỏ
0,15	60	200	50	0,4	10	3

2.2. Cấu trúc lưới và mô hình 3D mẫu in

Ở phần này, ba khối lập phương với các mẫu lưới in khác nhau bao gồm lưới tam giác (mô hình 1) với các góc đan (-30/30), lưới vuông (mô hình 2) với góc đan (0/90) và lưới vuông (mô hình 3) với góc đan (-45/45) được trình bày ở hình 1. Cả ba mô hình đều có mật độ điển đầy vật liệu như nhau, nhưng khối lượng có chênh lệch một lượng nhỏ do cách xếp lớp khác nhau. Cụ thể, khối lượng của mô hình 1, 2 và 3 lần lượt là 43g, 39g và 41g. Ba mô hình sau khi thiết lập các thông số in và mô phỏng cấu trúc lưới với phần mềm Cura được mô tả một cách chính xác với mô hình dự kiến in thực tế. Do đó, dựa trên kích thước và các thông số hình học của lớp in và lưới in, ba mô hình này được thiết kế ngược lại thành mô hình 3D bằng phần mềm Solidworks và tiếp tục được sử dụng để mô phỏng ứng xử cơ học bằng phần mềm Abaqus thông qua phương pháp phần tử hữu hạn.



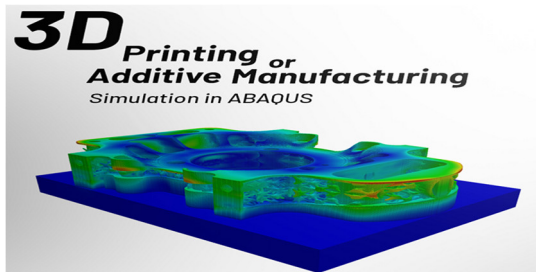
Hình 1. Mô hình cắt lớp với ba cấu trúc lưới khác nhau

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THÍ NGHIỆM

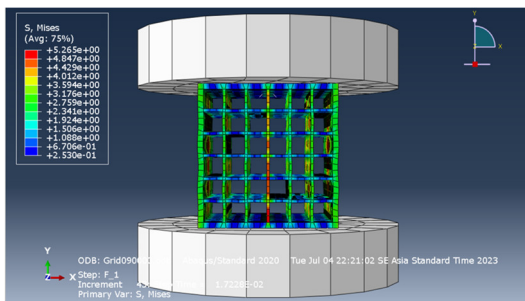
3.1. Kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng ứng xử biến dạng của ba khối lập phương sẽ được trình bày ở phần này. Phần tử tứ diện 8 nút được dùng để chia lưới phục vụ bài toán phân tích phần tử hữu hạn. Sau khi chia lưới mô hình 1 có 26.925 phần tử,

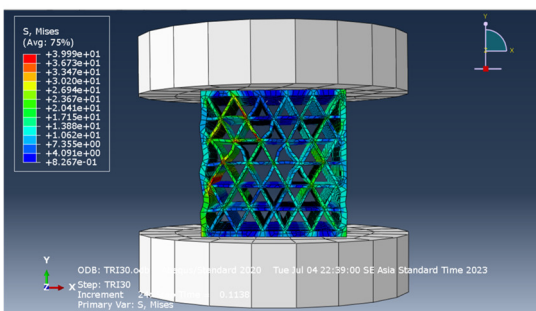
37.934 nút, mô hình 2 có 7.525 phần tử, 13.832 nút và mô hình 3 có 14.200 phần tử, 21.840. Dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn rời rạc hóa phần tử tích hợp sẵn trong Abaqus, sau khi đặt điều kiện biên mặt dưới cố định, mặt trên chịu biến dạng có khoảng dịch chuyển là 5mm, các kết quả về ứng suất nén tương đương của ba mô hình được hiển thị ở hình 2.



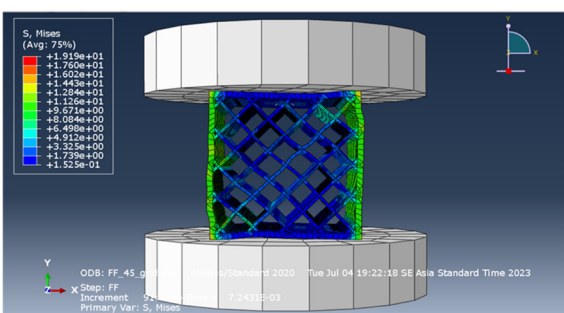
a) Mô phỏng bằng phần mềm Abaqus



b) Mô hình lưới vuông (0/90)



c) Mô hình lưới tam giác (-30/30)



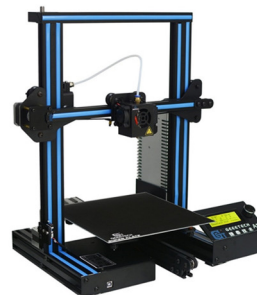
d) Mô hình lưới vuông (-45/45)

Hình 2. Kết quả mô phỏng biến dạng và ứng suất của ba mô hình nguyên cứu

3.2. Kết quả thí nghiệm

Dựa trên kết quả cắt lớp và cấu trúc lưới được thiết lập trên phần mềm Cura, một chương trình có đuôi g.code sẽ được xuất ra và nạp vào máy in 3D Prusa i3 để tiến hành in

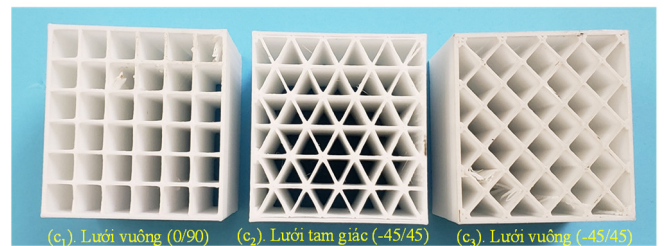
các mẫu thí nghiệm. Hình 3 minh họa các bước chính để chế tạo ra các mẫu tương đồng như mô hình 1, 2 và 3. Mô hình đã được đo và kiểm chứng độ chính xác kích thước đạt dung sai $\pm 0,2\text{mm}$ so với mô hình mô phỏng.



a) Máy in 3D Prusa i3

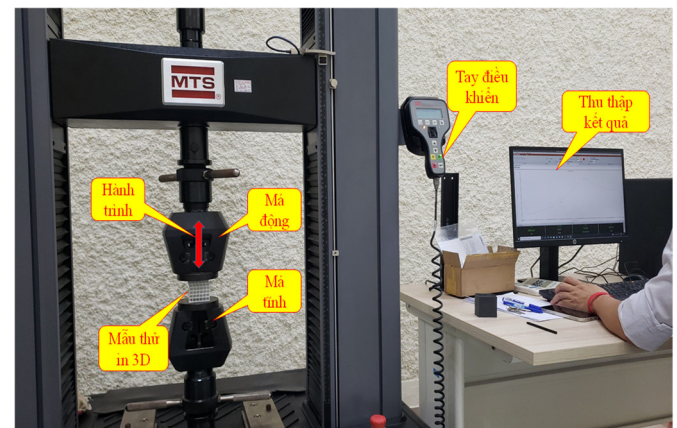


b) Quá trình in mẫu



c) Mẫu in hòa chỉnh

Hình 3. Ba mẫu in 3D hoàn chỉnh bằng vật liệu PLA trắng

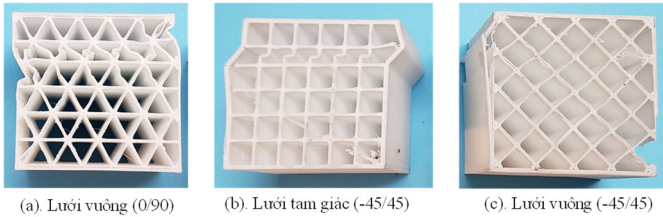


Hình 4. Hệ thống thí nghiệm nén trên máy MTS-45 của Mỹ

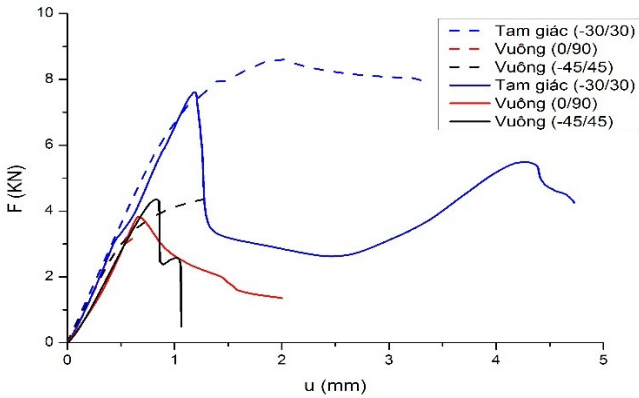
3.3. Kết quả mô phỏng và thí nghiệm

Biến dạng và các vị trí bị phá hủy của từng mẫu được thể hiện ở hình 5. Kết quả cho thấy các vị trí tập trung ứng suất cao ở mô hình mô phỏng dự đoán khá sát với vị trí bị phá hỏng trên mẫu thí nghiệm. Các đồ thị quan hệ giữa lực ép và chuyển vị nén của ba mẫu in được thu thập như trong hình 6. Đường nét gạch đứt thể hiện kết quả mô phỏng, đường nét gạch liền thể hiện kết quả thí nghiệm. So sánh tổng quan cho thấy, các cặp đồ thị giữa mô phỏng và thực nghiệm có sự tương đồng với nhau. Tuy nhiên, các kết quả mô phỏng cho thấy điểm chịu lực tới hạn của mẫu in cao hơn so với kết quả thí nghiệm. Một số lý do có thể kể đến như sự không hoàn hảo của mẫu in, các khuyết tật, lỗ rỗng và các liên kết giữa các lớp in của mẫu thật không thực sự tốt như mô hình mô phỏng. Kết quả nghiên cứu cho thấy biến dạng cho các

mô hình 2 và 3 nhỏ hơn so với mẫu 1 và quá trình phá hủy diễn ra đột ngột hơn so với mẫu 1 do các gân có liên kết rời rạc hơn mẫu 1 với các gân liên kết chéo nhau. Kết quả giữa dự đoán qua mô phỏng về độ cứng và tải trọng tới hạn của từng mẫu được tổng hợp cùng với kết quả đo từ thí nghiệm được thể hiện ở bảng 3. Sự sai lệch giữa hai kết quả này đã được giải thích ở phần trên. Ở nghiên cứu tiếp theo, khảo sát ảnh hưởng của nhiều thông số hình học của lưới in và ảnh hưởng của các khuyết tật trên mẫu in thật sẽ được kể đến trên mô hình 3D để có được dự đoán chính xác hơn về cơ tính của kết cấu in hơn.



Hình 5. Đồ thị biểu diễn quan hệ giữa chuyển vị và lực nén của



Hình 6. Đồ thị biểu diễn quan hệ giữa chuyển vị và lực nén của ba khối lập phương có cấu trúc khác nhau: Đường nét đứt thể hiện kết quả mô phỏng, đường nét liền thể hiện kết quả thí nghiệm

Bảng 3. So sánh kết quả giữa mô phỏng và thí nghiệm

Mẫu	Mô phỏng		Thí nghiệm	
	Lực tới hạn (KN)	Độ cứng (KN/mm)	Lực tới hạn (KN)	Độ cứng (KN/mm)
Lưới tam giác (-30/30)	8,6	7,1	7,6	5,5
Lưới vuông (0/90)	3,2	5,8	3,8	4,2
Lưới vuông (-45/45)	4,5	6,3	4,3	4,5

4. KẾT LUẬN

Ở nghiên cứu này, ảnh hưởng của một số cấu trúc lưới in điển hình đến cơ tính của chi tiết in 3D đã được khảo sát. Cụ thể, ba mô hình khối lập phương có các cấu trúc gồm lưới tam giác với các góc đan (-30/30), lưới vuông với góc đan (0/90) và lưới vuông với góc đan (-45/45) đã được khảo sát thông qua thí nghiệm nén. Kết quả mô phỏng dự đoán cơ tính trên Abaqus được kiểm nghiệm thông qua thí nghiệm trên máy kéo nén MTS-45 của Mỹ. Kết quả khảo sát cho thấy khả năng chịu tải hay cơ tính của mẫu lưới tam giác tốt hơn so với hai mẫu lưới còn lại. Kết quả của nghiên cứu này, bước

đầu chỉ ra được tầm quan trọng của cấu trúc lưới đến cơ tính của chi tiết hay kết cấu in 3D. Ở nghiên cứu tiếp theo, các cấu trúc lưới mô phỏng theo cấu trúc tự nhiên như cấu trúc xương, thân cây, lá cây hay còn gọi là cấu trúc lưới sinh học sẽ tiếp tục được khảo sát. Qua đó, các cấu trúc lưới in 3D tối ưu, phù hợp với các điều kiện chịu lực khác nhau của từng dạng kết cấu sẽ được đề xuất và kiểm chứng nhằm mở rộng hơn phạm vi ứng dụng của công nghệ in 3D trong tương lai.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo đã cấp kinh phí để thực hiện nghiên cứu này thuộc đề tài có mã số B2022-TNA-27. Nhóm nghiên cứu cảm ơn trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – Đại học Thái Nguyên và Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ nhóm nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bhandari S., Lopez-Anido R., "Finite element modeling of 3D-printed part with cellular internal structure using homogenized properties," *Progress in additive manufacturing*, 4, 143-154, 2019.
- [2]. Niutta C. B., Tridello A., Barletta G., Gallo N., Baroni A., Berto F., Paolino D. S., "Defect-Driven topology optimization for fatigue design of additive manufacturing structures: Application on a real industrial aerospace component," *Engineering Failure Analysis*, 142, 106737, 2022.
- [3]. Wickramasinghe S., Do T., Tran P., "FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments," *Polymers*, 12(7), 1529, 2020.
- [4]. Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T., Hui D., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196, 2018.
- [5]. Lozanovski B., Downing D., Tran P., Shidid D., Qian M., Choong P., Leary M., "A Monte Carlo simulation-based approach to realistic modelling of additively manufactured lattice structures," *Additive Manufacturing*, 32, 101092, 2020.
- [6]. Peng C., Tran P., Nguyen-Xuan H., Ferreira A. J. M., "Mechanical performance and fatigue life prediction of lattice structures: Parametric computational approach," *Composite Structures*, 235, 111821, 2020.
- [7]. Jihong Z. H. U., Han Z. H. O. U., Chuang W. A. N. G., Lu Z. H. O. U., Shangqin Y. U. A. N., Zhang W., "A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges," *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91-110, 2021.
- [8]. Goh G. D., Sing S. L., Yeong W. Y., "A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges," *Artificial Intelligence Review* 54(1), 63-94, 2021.

AUTHORS INFORMATION

Hoang Tien Dzung¹, Nguyen Huu Phan¹, Hoang Tien Dat²

¹Hanoi University of Industry, Vietnam

²Thai Nguyen University of Technology - Thai Nguyen University, Vietnam