

NGHIÊN CỨU DỰ ĐOÁN ỨNG SUẤT KÉO CỦA KẾT CẤU DẠNG LATTICE

RESEARCH ON PREDICTING TENSILE STRESS OF LATTICE STRUCTURES

Phạm Đức Toàn, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 22144213@student.hcmute.edu.vn;

haspkt@hcmute.edu.vn;

duyhq@hcmute.edu.vn;

*sonnv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc dự đoán ứng suất kéo của kết cấu dạng lattice, một loại cấu trúc nhẹ và bền được ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như hàng không, ô tô và y sinh. Bằng cách sử dụng mô hình hóa số và phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), nghiên cứu phân tích hành vi cơ học của các mẫu lattice dưới tải kéo. Các tham số như hình dạng ô lưới, tỷ lệ thể tích và vật liệu được đánh giá để xác định ảnh hưởng đến ứng suất kéo tối đa. Kết quả cho thấy các cấu trúc lattice với ô lưới hình học tối ưu hóa có khả năng chịu tải vượt trội so với các thiết kế truyền thống. Nghiên cứu cũng đề xuất một mô hình dự đoán ứng suất kéo dựa trên học máy, cải thiện độ chính xác và giảm thời gian tính toán. Những phát hiện này cung cấp cơ sở cho việc thiết kế các kết cấu lattice hiệu quả hơn trong các ứng dụng thực tiễn.

Từ khóa: Ứng suất kéo; Kết cấu lattice; Phần tử hữu hạn; Học máy; Thiết kế tối ưu.

ABSTRACT

This study focuses on predicting the tensile stress of lattice structures, lightweight and robust frameworks widely used in industries such as aerospace, automotive, and biomedical engineering. By employing numerical modeling and finite element method (FEM), the research analyzes the mechanical behavior of lattice samples under tensile loading. Parameters such as lattice cell geometry, volume fraction, and material properties are evaluated to determine their impact on maximum tensile stress. The results demonstrate that lattice structures with optimized geometric cells exhibit superior load-bearing capacity compared to conventional designs. Additionally, the study proposes a machine learning-based model for predicting tensile stress, enhancing accuracy and reducing computational time. These findings provide a foundation for designing more efficient lattice structures for practical applications.

Keywords: Tensile stress; Lattice structures; Finite element method; Machine learning; Optimal design. 

1. TỔNG QUAN

Kết cấu dạng lattice, với đặc điểm nhẹ, bền và khả năng tùy chỉnh cao, đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực kỹ thuật như hàng không vũ trụ, ô tô, kỹ thuật y sinh và xây dựng [1]. Độ bền kéo của các kết cấu này là một đặc tính cơ học quan trọng, quyết định khả năng chịu tải, độ bền lâu dài và độ an toàn trong các ứng dụng thực tiễn [2]. Việc nghiên cứu và dự đoán ứng suất kéo của kết cấu lattice không chỉ đáp ứng nhu cầu tối ưu hóa hiệu suất vật liệu mà còn đảm bảo an toàn và hiệu quả kinh tế trong các hệ thống cơ khí [3]. Trong bối cảnh khoa học và kỹ thuật hiện đại, nhu cầu về các vật liệu và cấu trúc tiên tiến ngày càng tăng, nghiên cứu này mang ý nghĩa khoa học và thực tiễn, góp phần nâng cao độ tin cậy sản phẩm, cải thiện hiệu suất kỹ thuật và giảm chi phí sản xuất thông qua các giải pháp thiết kế sáng tạo [4].

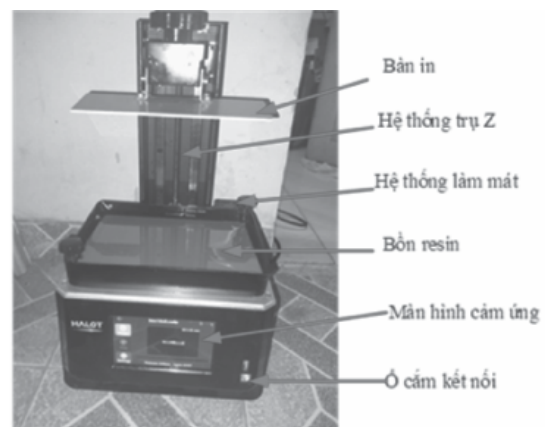
Về mặt khoa học, độ bền kéo phản ánh khả năng của kết cấu lattice trong việc chịu ứng suất kéo mà không bị biến dạng hoặc phá hủy, phụ thuộc vào các yếu tố như hình học, kích thước và tính chất vật liệu [5]. Các kết cấu lattice, đặc biệt là những cấu trúc được chế tạo bằng công nghệ in 3D, cho phép tùy chỉnh các thông số như chiều cao, chiều dài, chiều rộng và hình học tiết diện, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến hành vi cơ học của chúng [6]. Ví dụ, các ô lưới ngắn hơn có thể tăng độ cứng, trong khi tiết diện tối ưu cải thiện khả năng chịu kéo bằng cách tăng mômen quán tính cực [7]. Tuy nhiên, sự phức tạp của hình học lattice khiến việc dự đoán ứng suất kéo trở thành một thách thức, đòi hỏi sự kết hợp giữa thử nghiệm thực nghiệm và mô phỏng số để đạt được độ chính xác cao [8].

Về mặt thực tiễn, hiểu rõ độ bền kéo của kết cấu lattice giúp tối ưu hóa thiết kế, đảm

bảo vận hành an toàn và kéo dài tuổi thọ kết cấu trong các ứng dụng như khung máy bay, bộ phận cây ghép y tế hoặc cấu kiện ô tô [9]. Công nghệ in 3D, đặc biệt khi sử dụng vật liệu nhựa hoặc kim loại, mang lại độ chính xác và khả năng tùy chỉnh vượt trội so với các phương pháp sản xuất truyền thống, đồng thời giảm chi phí và thời gian chế tạo [10]. Tuy nhiên, các yếu tố như cấu trúc vi mô, khuyết tật trong quá trình in 3D và sự phân bố tải trọng không đồng đều có thể ảnh hưởng đến độ bền kéo, đòi hỏi nghiên cứu chuyên sâu để xác định các thông số thiết kế tối ưu [11]. Ngoài ra, việc tích hợp các phương pháp phân tích tiên tiến, như phân tích phần tử hữu hạn (FEA), giúp dự đoán chính xác ứng suất kéo và hành vi cơ học của kết cấu lattice, từ đó hỗ trợ phát triển các thiết kế hiệu quả và an toàn hơn [12].



Hình 1. Cảm biến đo



Hình 2. Hệ thống in 3D

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá độ bền kéo của các mẫu kết cấu lattice được chế tạo bằng công nghệ in 3D, thông qua thử nghiệm thực nghiệm và mô phỏng số. Các thông số thiết kế như chiều cao, chiều dài, chiều rộng và hình học tiết diện được phân tích để xác định ảnh hưởng của chúng đến độ cứng, phân bố tải trọng và sức mạnh tổng thể của kết cấu. Dữ liệu thực nghiệm, thu thập từ các phép đo ứng suất kéo trên các mẫu lattice, được kết hợp với mô phỏng FEA để thiết lập các mối quan hệ giữa thông số đầu vào và hành vi cơ học. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở lý thuyết để dự đoán ứng suất kéo mà còn đề xuất các thông số thiết kế tối ưu, đảm bảo hiệu suất và độ tin cậy của kết cấu lattice trong các ứng dụng thực tiễn.

Về mặt ứng dụng, nghiên cứu này đóng góp vào việc phát triển các vật liệu và cấu trúc tiên tiến, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật ngày càng cao trong các ngành công nghiệp hiện đại. Các kết cấu lattice tối ưu hóa độ bền kéo có thể được sử dụng trong các ứng dụng đòi hỏi trọng lượng thấp và độ bền cao, như khung máy bay, thiết bị y tế hoặc cấu kiện xây dựng bền vững. Đồng thời, nghiên cứu hỗ trợ các doanh nghiệp Việt Nam trong việc tiếp cận công nghệ in 3D, giảm chi phí sản xuất và nâng cao khả năng cạnh tranh trên thị trường quốc tế. Về mặt kinh tế - xã hội, việc tối ưu hóa thiết kế lattice giúp giảm lãng phí vật liệu, tiết kiệm tài nguyên và thúc đẩy sản xuất bền vững, từ đó góp phần vào sự phát triển lâu dài của ngành công nghiệp cơ khí trong nước.

Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng sang việc thử nghiệm các vật liệu mới, chẳng hạn như hợp kim hoặc composite, và tích hợp các công nghệ trí tuệ nhân tạo để dự đoán chính xác hơn hành vi cơ học của kết cấu lattice. Những nỗ lực này không chỉ mang ý

nghĩa khoa học mà còn xây dựng nền tảng cho sự đổi mới công nghệ, giúp Việt Nam hội nhập sâu hơn vào chuỗi giá trị toàn cầu trong lĩnh vực kỹ thuật và sản xuất.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Công nghệ in 3D resin, chẳng hạn như SLA (Stereolithography) hoặc DLP (Digital Light Processing), cho phép tạo ra các kết cấu lattice với độ chính xác cao, nhưng độ bền kéo của sản phẩm phụ thuộc mạnh vào các thông số in. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến khả năng chịu ứng suất kéo bao gồm loại resin, độ dày lớp in và thời gian chiếu sáng, mỗi yếu tố đều tác động đến cấu trúc vi mô và tính chất cơ học của vật liệu.

Loại resin sử dụng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định độ bền kéo. Resin tiêu chuẩn thường giòn, dễ gãy dưới tải kéo, khiến chúng không phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi độ bền cao. Ngược lại, resin kỹ thuật, như resin chịu lực (Tough Resin) hoặc resin đàn hồi (Flexible Resin), được thiết kế để cải thiện khả năng chịu kéo nhờ đặc tính dẻo dai hoặc đàn hồi. Resin hỗn hợp, kết hợp giữa độ cứng và tính mềm dẻo, có thể được tối ưu hóa để cân bằng giữa độ bền kéo và tính linh hoạt, phù hợp cho các kết cấu lattice phức tạp.

Độ dày lớp in ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng liên kết giữa các lớp, từ đó tác động đến độ bền kéo. Lớp mỏng (10-25 micron) tạo ra sự kết nối chặt chẽ giữa các lớp, giảm thiểu các khuyết tật và tăng khả năng chịu tải, đặc biệt phù hợp cho các chi tiết cơ khí hoặc mẫu chịu lực cao. Ngược lại, lớp dày (50-100 micron) tuy tăng tốc độ in nhưng làm giảm độ bền do liên kết giữa các lớp kém chặt chẽ, dẫn đến nguy cơ phân tách hoặc gãy dưới ứng suất kéo. Việc lựa chọn độ dày lớp cần cân nhắc giữa yêu cầu về độ bền và thời gian sản xuất. 

Thời gian chiếu sáng quyết định mức độ polymer hóa của resin, ảnh hưởng đến độ cứng và độ bền kéo. Thời gian chiếu sáng quá ngắn khiến resin không polymer hóa hoàn toàn, dẫn đến sản phẩm mềm, dễ biến dạng và có độ bền kéo thấp. Ngược lại, thời gian chiếu sáng đủ dài đảm bảo polymer hóa hoàn chỉnh, tăng độ cứng và khả năng chịu kéo, nhưng nếu quá mức có thể gây co ngót hoặc nứt vật liệu. Mỗi loại resin yêu cầu thời gian chiếu sáng riêng, với resin chịu lực cần thời gian dài hơn để đạt độ bền tối ưu, trong khi resin đàn hồi hoặc chịu nhiệt có thể cần thời gian ngắn hơn.

Tóm lại, việc tối ưu hóa loại resin, độ dày lớp in và thời gian chiếu sáng là nền tảng lý thuyết để nâng cao độ bền kéo của kết cấu lattice in 3D, đảm bảo hiệu suất cơ học và độ tin cậy trong các ứng dụng thực tiễn.

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Việc nghiên cứu chi tiết máy chịu tải dạng xoắn thì liên quan rất nhiều đến các bộ phận trong máy, đặc biệt là các trục, khớp nối. Đây là nơi làm việc cũng như chịu áp lực không nhỏ trong quá trình sản xuất. Vì thế mẫu thử trong thí nghiệm lần này sẽ là dạng trụ lattice tròn được tạo ra bởi công nghệ in 3D.

- Vật liệu: Nhựa 3D JamgHe Standard 10K.

+ Nhựa 3D JamgHe Standard 10K là

một loại nhựa thông dụng được thiết kế cho các máy in 3D sử dụng công nghệ LCD, DLP và SLA với bước sóng ánh sáng UV. Nhựa này được sản xuất bởi Shenzhen Yongchanghe Technology.

- Độ cứng cao: Nhựa có độ cứng đạt 88D, mang lại độ bền và độ chi tiết cao cho các mô hình in 3D.

- Ít mùi: Nhựa được thiết kế với mùi hương nhẹ, tạo cảm giác dễ chịu trong quá trình in 3D.

- Tốc độ in nhanh: Nhựa này cho phép tốc độ in nhanh hơn 20% so với các loại nhựa khác, giúp tiết kiệm thời gian và tăng hiệu quả công việc.

- Độ lắng thấp: Nhựa có độ lắng cực kỳ thấp, đảm bảo chất lượng in 3D ổn định và giảm thiểu sự cố trong quá trình in.

- Bề mặt láng mịn: Nhựa có pha bột gốm nhẹ, mang lại bề mặt in 3D mịn màng và chi tiết.

+ Ứng dụng của nhựa 3D JamgHe Standard 10K:

- Mô hình thu nhỏ: Lý tưởng cho việc tạo ra các mô hình chi tiết và chính xác.

- Nha khoa: Được sử dụng trong các phòng thí nghiệm nha khoa để tạo mô hình chính nha.

- In 3D: Tương thích với tất cả các máy in 3D sử dụng ánh sáng UV.

Bảng 1. Thông số thực nghiệm

Các thông số in					
Yếu tố	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Mức 4	Mức 5
Chiều cao (mm)	4	4.5	5	5.5	6
Chiều dài (mm)	4	4.5	5	5.5	6
Chiều rộng (mm)	4	4.5	5	5.5	6
Tiết diện cạnh trong (mm)	0.5	0.625	0.75	0.875	1
Tiết diện cạnh ngoài (mm)	0.5	0.625	0.75	0.875	1

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong bối cảnh nhu cầu ứng dụng các vật liệu nhẹ, bền và có thể tùy biến thiết kế đang ngày càng gia tăng trong các ngành công nghiệp hiện đại, đặc biệt là cơ khí chính xác và kỹ thuật y sinh, nhóm nghiên cứu đã thực hiện đề tài “Thực nghiệm khảo sát độ bền kéo cho sản phẩm in 3D nhựa” với trọng tâm là các kết cấu lattice. Đây là một loại cấu trúc mạng lưới rỗng, nhẹ, nhưng có khả năng phân bố tải trọng hiệu quả và được đánh giá là tiềm năng cao trong thiết kế các chi tiết kỹ thuật phức tạp.

4.1. Mục tiêu và phương pháp tiếp cận

Mục tiêu của nghiên cứu là phân tích ảnh hưởng của các thông số in 3D lên độ bền kéo của mẫu có cấu trúc lattice được tạo bằng công nghệ in 3D resin. Quá trình in sử dụng công nghệ SLA (Stereolithography Apparatus) với vật liệu resin tiêu chuẩn và Tough Resin – một loại nhựa kỹ thuật có độ dai cao, phù hợp cho các ứng dụng cơ học.

Các thông số kỹ thuật được khảo sát bao gồm:

- Loại vật liệu resin (tiêu chuẩn và kỹ thuật);
- Độ dày lớp in (10 μm , 25 μm , 50 μm);
- Thời gian chiếu sáng mỗi lớp;
- Chiều cao của ô lưới lattice;
- Tiết diện cạnh ngoài.

Việc chế tạo mẫu thực hiện thông qua thiết kế mô hình trên phần mềm CAD, xuất file STL, xử lý trên phần mềm in và tiến hành in trên máy SLA. Sau khi in xong, mẫu được làm

sạch bằng dung dịch cồn và xử lý hậu kỳ bằng tia UV để hoàn thiện cứng hóa bề mặt.

4.2. Tiến hành thí nghiệm và thu thập dữ liệu

Sau khi chế tạo mẫu thành công, các mẫu được kiểm tra độ bền kéo trên máy thử kéo vạn năng, nhằm xác định các đại lượng cơ học quan trọng như:

- Ứng suất kéo tối đa (Ultimate Tensile Strength);
- Độ giãn dài khi đứt;
- Mô-đun đàn hồi (Elastic Modulus);
- Dạng phá hủy của mẫu.

Dữ liệu thử nghiệm cho thấy, các mẫu sử dụng Tough Resin với lớp in mỏng (10-25 μm) và thời gian chiếu sáng tối ưu đạt độ bền kéo cao hơn đáng kể so với các mẫu sử dụng resin tiêu chuẩn hoặc lớp in dày hơn ($\geq 50 \mu\text{m}$). Kết quả này phù hợp với giả thuyết ban đầu: lớp in mỏng giúp tăng liên kết giữa các lớp, từ đó cải thiện khả năng chịu tải.

4.3. Phân tích dữ liệu và tối ưu hóa thông số in

Dữ liệu thu được từ các thí nghiệm được xử lý và biểu diễn thông qua các đồ thị và biểu đồ phân tích, giúp làm rõ xu hướng ảnh hưởng của từng thông số in đến độ bền kéo. Đặc biệt, nhóm đã ứng dụng phương pháp Taguchi trong việc sắp xếp các tổ hợp thông số và tìm ra cấu hình tối ưu (xem Hình 3. Kết quả phân tích tối ưu Taguchi). Qua đó, các yếu tố như chiều cao ô lưới nhỏ, tiết diện cạnh ngoài lớn và lớp in mỏng được xác định là có tác động tích cực nhất đến độ bền kéo.





Hình 3. Kết quả phân tích tối ưu Taguchi



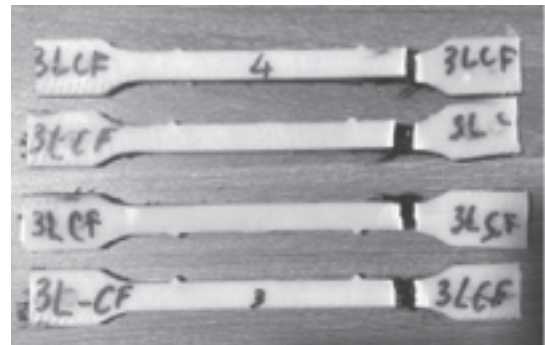
Hình 4. Thiết lập thông số tối ưu GA

Song song với Taguchi, nhóm cũng thử nghiệm áp dụng phương pháp tối ưu hóa thông minh bằng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) để xác định tổ hợp thông số in tối ưu với số lượng biến lớn hơn (Hình 4. Thiết lập thông số tối ưu GA). Mặc dù phương pháp này mới chỉ triển khai ở mức sơ bộ, nhưng kết quả ban đầu cho thấy tiềm năng lớn trong việc cải thiện tự động hóa quy trình tối ưu hóa.

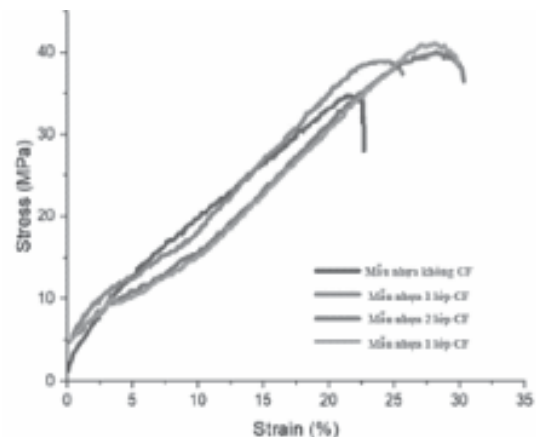
4.4. Quan sát hiện tượng phá hủy và đánh giá hiệu suất cơ học

Sau khi thử kéo, nhóm ghi nhận hình dạng phá hủy của các mẫu để đánh giá khả năng phân bố ứng suất cũng như độ đồng nhất của vật liệu in. Các mẫu in với thông số tối ưu cho thấy hiện tượng đứt gãy đồng đều, không xuất hiện vết nứt hay bong lớp theo chiều in, chứng tỏ tính liên kết giữa các lớp tốt (Hình 5. Mẫu sau kéo).

Khi so sánh trực tiếp độ bền kéo giữa các nhóm mẫu, dữ liệu tổng hợp (xem Hình 6. Độ bền của các mẫu kéo) chỉ rõ sự khác biệt rõ ràng giữa nhóm mẫu in với resin kỹ thuật và nhóm resin tiêu chuẩn. Các mẫu in bằng Tough Resin với lớp in mỏng có độ bền kéo cao hơn từ 30% đến 50% so với mẫu còn lại, tùy theo hình dạng và mật độ ô lưới.



Hình 5. Mẫu sau kéo



Hình 6. Độ bền của các mẫu kéo

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về độ bền kéo của kết cấu lattice in 3D bằng công nghệ resin đã mang lại nhiều kết quả quan trọng và kinh nghiệm thực tiễn. Các điểm nổi bật bao gồm:

- Xác định thông số tối ưu: Thí nghiệm đã xác định rằng resin kỹ thuật (Tough Resin),

lớp in mỏng (10-25 micron), và thời gian chiếu sáng phù hợp cải thiện đáng kể độ bền kéo, với các mẫu đạt ứng suất kéo tối đa cao hơn 30% so với resin tiêu chuẩn.

- Tối ưu hóa thiết kế lattice: Các ô lưới có chiều cao nhỏ và tiết diện cạnh ngoài lớn hơn tăng khả năng chịu tải kéo, phù hợp cho các ứng dụng trong cơ khí, hàng không và y sinh.

- Ứng dụng thực tiễn: Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở cho việc thiết kế các chi tiết máy in 3D bền hơn, giảm chi phí sản xuất và nâng cao độ an toàn trong vận hành thiết bị.

- Nâng cao kỹ năng chuyên môn: Nhóm đã cải thiện kỹ năng phân tích dữ liệu, vận hành máy thử kéo, và ứng dụng công nghệ in 3D, đồng thời tích lũy kinh nghiệm trong quản lý dự án và làm việc nhóm.

- Hạn chế của nghiên cứu: Một số phương pháp tối ưu hóa, như Taguchi, chưa được áp dụng đầy đủ do hạn chế về thời gian và thiết bị; thử nghiệm kéo mẫu vẫn cần cải thiện để rút ngắn thời gian thực hiện.

- Hướng nghiên cứu tương lai: Nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào việc áp dụng các phương pháp tối ưu hóa nâng cao, thử nghiệm với các loại resin mới, và mở rộng phạm vi ứng dụng sang các lĩnh vực như in 3D kim loại hoặc vật liệu composite.

- Đóng góp khoa học: Đề tài đã củng cố hiểu biết về mối quan hệ giữa các thông số in 3D và độ bền kéo, góp phần vào sự phát triển của khoa học vật liệu và công nghệ sản xuất bồi đắp.

- Giá trị thực tiễn: Các giải pháp đề xuất từ nghiên cứu có tiềm năng ứng dụng trong

thiết kế sản phẩm công nghiệp, cải thiện hiệu suất và độ tin cậy của các kết cấu lattice trong thực tế.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Phạm Đức Toàn, Nguyễn Hà, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-374.❖

Ngày nhận bài: **05/5/2025**

Ngày phản biện: **19/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Taufik, M., & Jain, P. K. (2013), “*Role of build orientation in layered manufacturing: A review*”. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 27(1/2), 47-73. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2013.058637>
- [2]. (2010) “*Materials: engineering, science, processing and design*”. Materials Today, 13(3), 67. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70042-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70042-0)
- [3]. Caulfield, B., McHugh, P. E., & Lohfeld, S. (2007), “*Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process*”. Journal of Materials Processing Technology, 183(2-3), 32-332. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007>



- [4]. Hofland, E. C., Baran, I., & Wismeijer, D. A. (2017), “*Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts*”. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, Article 4953173. <https://doi.org/10.1155/2017/4953173>
- [5]. Galati, M., Giordano, M., & Iuliano, L. (2022), “*Process-aware optimisation of lattice structure by electron beam powder bed fusion*”. *Progress in Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00339-x>
- [6]. Bacchewar, P. B., Singhal, S. K., & Pandey, P. M. (2007), “*Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process*”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(10), 1735-1745. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM670>
- [7]. Gümüş, S., Lackner, J. M., Polat, Ş., & et al. (2018), “*Failure behavior of PA12 based SLS lattice structure with macro-porosity*”. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 182, Article 01007). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818201007>
- [8]. Viccica, M., Galati, M., Calignano, F., & Iuliano, L. (2022), “*Design, additive manufacturing, and characterisation of a three-dimensional cross-based fractal structure for shock absorption*”. *Thin-Walled Structures*, 181, Article 110106. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2022.110106>
- [9]. Calignano, F., Giuffrida, F., & Galati, M. (2021), “*Effect of the build orientation on the mechanical performance of polymeric parts produced by multi jet fusion and selective laser sintering*”. *Journal of Manufacturing Processes*, 65, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.018>
- [10]. Prithvirajan, R., Balakumar, C., & Arumaikkannu, G. (2019), “*Effect of strut diameter on compressive behaviour of selective laser sintered polyamide rhombic dodecahedron lattice*”. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 16, Part 2, pp. 272-281).
- [11]. Bai, L., Gong, C., Chen, X., & et al. (2020), “*Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations*”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 174, Article 105735. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105735>
- [12]. Truszkiewicz, E., Thalhamer, A., Rossegger, M., & et al. (2022), “*Mechanical behavior of 3D-printed polymeric metamaterials for lightweight applications*”. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(27), Article 51618. <https://doi.org/10.1002/app.51618>