

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

HUỲNH HỮU NGHỊ

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG SẢN PHẨM
CỦA CÔNG NGHỆ FDM**

Ngành: Kỹ Thuật Cơ Khí

Mã số ngành: 62520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2022

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn: PGS.TS THÁI THỊ THU HÀ

Phản biện độc lập 1:

Phản biện độc lập 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....
.....
vào lúc giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

Công nghệ FDM đã được sử dụng khá phổ biến và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực với hình dạng và kích thước khác nhau. Công nghệ này có nhiều ưu điểm như tính tạo hình linh hoạt, sử dụng vật liệu phổ biến, đa dạng, chi phí thấp... Tuy nhiên, hiện nay công nghệ FDM còn tồn tại một số vấn đề ảnh hưởng đến chất lượng như: độ chính xác kích thước, độ bền kéo của sản phẩm. Vì vậy, trong những năm gần đây, có nhiều nghiên cứu liên quan đến lĩnh vực công nghệ FDM đã được thực hiện với các hướng khác nhau. Quá trình khảo sát các công trình nghiên cứu đã được công bố cho thấy:

1.1 Một số vấn đề:

Về thông số công nghệ: các công trình nghiên cứu đều khẳng định các thông số công nghệ có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác kích thước, các đặc tính cơ học và có thể cải thiện bằng việc lựa chọn, kiểm soát các thông số công nghệ đó tùy theo từng mục tiêu sử dụng. Cụ thể, các thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền kéo và độ chính xác kích thước bao gồm: chiều dày lớp, góc đường đùn, tốc độ đầu đùn, mật độ điền đầy, hướng chế tạo, kiểu điền đầy, nhiệt độ đầu đùn, bề rộng đường đùn và số đường bao ngoài. Đồng thời, các nhà nghiên cứu cũng kiến nghị nên tăng số lượng thông số đầu vào và các mức giá trị của thông số để có thể đạt được kết quả chính xác hơn.

Về vật liệu: đa phần các nghiên cứu sử dụng vật liệu đơn chất như: ABS, PLA... Một số công trình gần đây sử dụng các loại vật liệu tổng hợp và kết quả cho thấy đối với từng loại vật liệu khác nhau thì ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến chất lượng là khác nhau. Ngoài ra, còn có một số công trình nghiên cứu để tạo ra các loại vật liệu mới như nhựa PLA-đồng, PLA-sắt, ABS-đồng... là những loại vật liệu tổng hợp với chất nền nhựa là PLA hoặc

ABS. Đây cũng là mục tiêu của nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới nhằm mở rộng ứng dụng của công nghệ FDM trong thực tế sản xuất.

Về phương pháp thực hiện: các công trình nghiên cứu thường sử dụng phương pháp phân tích ANOVA hay phân tích S/N để phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến mục tiêu đầu ra và sử dụng phương pháp Taguchi để thiết kế thí nghiệm. Tuy nhiên, các công trình gần đây thường sử dụng phương pháp đáp ứng bề mặt, phương pháp thiết kế Q (Q-design optimal) do chúng có ưu điểm là độ chính xác cao, mô hình quy hoạch dựa trên các bề mặt (phương pháp đáp ứng bề mặt) cho phép rút ngắn số lần thực nghiệm một cách đáng kể nhưng vẫn đảm bảo chất lượng đầu ra của nghiên cứu. Đồng thời, các công trình cũng sử dụng song song các công cụ như quan hệ xám, mạng nơ ron nhân tạo, ANFIS để huấn luyện dữ liệu đầu vào nhằm dự đoán kết quả mục tiêu đầu ra. Từ đó, so sánh kết quả, khả năng của các phương pháp để rút ra ưu nhược điểm nhằm giúp ích cho những nghiên cứu sau này.

1.2 Vấn đề còn tồn tại

Các công trình nghiên cứu còn chưa trình bày một cách đầy đủ về các thông số công nghệ cũng như ảnh hưởng tương tác của chúng đến khả năng cải thiện chất lượng (độ chính xác kích thước và độ bền kéo) cho sản phẩm FDM, đặc biệt là thông số nhiệt độ bùồng tạo sản phẩm. Nhiệt độ bùồng tạo sản phẩm là thông số quan trọng có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác kích thước và đặc tính cơ học do nó góp phần làm giảm độ cong vênh biến dạng tách lớp và cải thiện độ liên kết giữa các đường nhựa, các lớp với nhau trong quá trình chế tạo. Tuy nhiên, hiện nay, có rất ít công trình nghiên cứu về thông số này, nhất là về sự ảnh hưởng và điều chỉnh giá trị của nó để tối ưu độ chính xác kích thước và độ bền kéo cho sản phẩm FDM. Do đó, cần phải xây dựng một phương pháp tiếp cận mang tính hệ thống để hiểu rõ hơn về ảnh hưởng của các thông số công nghệ khác nhau, trong đó có thông số nhiệt độ bùồng, và sự tương tác của

chúng đến độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm. Đồng thời, xây dựng một mô hình thực nghiệm để người sử dụng có thể dễ dàng dự đoán và kiểm soát được chất lượng theo chức năng, yêu cầu sử dụng của sản phẩm. Từ đó có thể xác định một phương pháp/hướng nghiên cứu hoàn chỉnh góp phần hoàn thiện công nghệ FDM để ứng dụng trong sản xuất công nghiệp.

1.3 Đề xuất mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu của luận án được đề xuất như sau:

Mục tiêu chung:

Nghiên cứu nâng cao chất lượng sản phẩm được chế tạo bằng công nghệ FDM.

Mục tiêu cụ thể:

- Xác định ảnh hưởng của năm thông số công nghệ quan trọng đến độ chính xác kích thước và độ bền kéo trong quá trình chế tạo nhằm kiểm soát một cách hiệu quả chất lượng của sản phẩm FDM.
- Xây dựng mô hình thực nghiệm biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm FDM.
- Xác định được các giá trị thông số công nghệ tối ưu nhằm cải thiện độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm FDM.
- Xây dựng quy trình giúp cho quá trình kiểm định thiết bị FDM được chế tạo tại Việt Nam trong tương lai.
- Đề xuất mô hình dự đoán độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm FDM dựa trên các thông số công nghệ đầu vào với độ chính xác hợp lý nhằm giảm thời gian thực nghiệm khi cần thiết.

1.4 Phạm vi nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu: tập trung vào các chỉ tiêu chất lượng quan trọng của sản phẩm công nghiệp, cụ thể là độ chính xác kích thước và độ bền kéo.

Thông số thực nghiệm: các thông số thực nghiệm được lựa chọn trong luận án bao gồm hai nhóm:

Nhóm thông số thay đổi: chiều dày lớp, góc đường đùn, tốc độ đầu đùn, mật độ điền đầy và *hiệu suất tạo sản phẩm*.

Nhóm thông số cố định: dựa vào các công trình nghiên cứu đã khảo sát, các thông số cố định được chọn bao gồm hướng chế tạo, kiểu điền đầy, nhiệt độ đầu đùn, bề rộng đường đùn và số đường bao ngoài.

Phương pháp thực nghiệm: luận án định hướng tập trung vào các phương pháp có độ chính xác cao, tiếp cận đơn giản, dễ hiểu, dễ sử dụng và tối ưu được đa mục tiêu cụ thể:

- Sử dụng phương pháp phân tích ANOVA để đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến mục tiêu.
- Sử dụng phương pháp FCCCD để thiết kế thí nghiệm theo hướng kết hợp giảm (32 thí nghiệm) và tối ưu thông số công nghệ. Trong đó, mỗi thông số thí nghiệm sẽ có ba mức giá trị là thấp (-1), trung bình (0) và cao (1).
- sử dụng thuật toán tối ưu hóa hàm mục tiêu bằng phương pháp RSM (Response Surface Design) để tìm các giá trị của từng thông số công nghệ cho mục tiêu đề ra.
- Sử dụng mô hình mạng nơ ron nhân tạo (ANN) để dự đoán kết quả độ chính xác kích thước và độ bền kéo dựa trên các thông số đầu vào. Tiến hành so sánh giữa phương pháp nhằm đưa ra đánh giá, kết luận.

Vật liệu sử dụng: với mục đích tập trung cải thiện chất lượng của công nghệ FDM để chế tạo các sản phẩm phục vụ trong lĩnh vực công nghiệp, đặc biệt là trong lĩnh vực cơ khí, luận án chọn vật liệu sử dụng là nhựa PLA-đồng.

1.5 Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp thu thập và tổng hợp tài liệu: các tài liệu được thu thập từ các nhà xuất bản như Springer, ScienceDirect, MDPI, Academia, Google Scholar, Taylor & Francis, Scopus, Microsoft Academic, Emerald Group Publishing, Hindawi... các tài liệu được hệ thống hoá và sắp xếp hợp lý.

Phương pháp phân tích - tổng hợp: dựa vào mục tiêu, thông số, phương pháp thực hiện, kết quả mong muốn để xác định các vấn đề còn tồn tại của các nghiên cứu đã có. Đánh giá, phân tích, tổng hợp và đề xuất mục tiêu, phương pháp, quy trình thực hiện một cách đầy đủ và phù hợp với điều kiện nghiên cứu.

Phương pháp dùng số liệu: số liệu sử dụng trong luận án được tham khảo từ các công trình nghiên cứu trước đó và kinh nghiệm trong quá trình sử dụng thiết bị FDM. Các nghiên cứu này đã được xác minh và công bố bởi các nhà xuất bản uy tín.

Phương pháp tính toán và mô phỏng: từ những nghiên cứu trước đó và các kiến thức tổng hợp đưa ra các phương pháp tính toán, xử lý số liệu hợp lý và thực hiện bài toán mô phỏng phục vụ cho quá trình nghiên cứu.

1.6 Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn

Ý nghĩa khoa học:

- Đánh giá được ảnh hưởng của các thông số công nghệ quan trọng như chiều dày lớp, tốc độ đầu đùn, góc đường đùn, mật độ điền đầy và nhiệt độ bùong tạo mẫu đến độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm FDM trong điều kiện gia công cụ thể.
- Xác lập được chế độ công nghệ tối ưu bằng cách sử dụng phần mềm thông qua ứng dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm.
- Xây dựng được mô hình toán học biểu diễn mối quan hệ giữa các yếu tố của chất lượng sản phẩm (độ chính xác kích thước và độ bền kéo)

với các thông số công nghệ trong quá trình gia công và mô hình dự đoán kết quả mục tiêu đầu ra dựa trên các thông số đầu vào. Mỗi quan hệ này có thể trở thành thuật toán cho phần mềm tối ưu hóa các thông số công nghệ trong quá trình chế tạo sản phẩm bằng công nghệ FDM.

- Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho các hướng nghiên cứu sau này theo hướng mở rộng và nâng cao hơn không chỉ cho công nghệ FDM mà còn cho các công nghệ AM khác như SLA, DLP, SLM... về chế độ gia công tối ưu và tối ưu hóa quá trình gia công nhằm nâng cao chất lượng và năng suất.

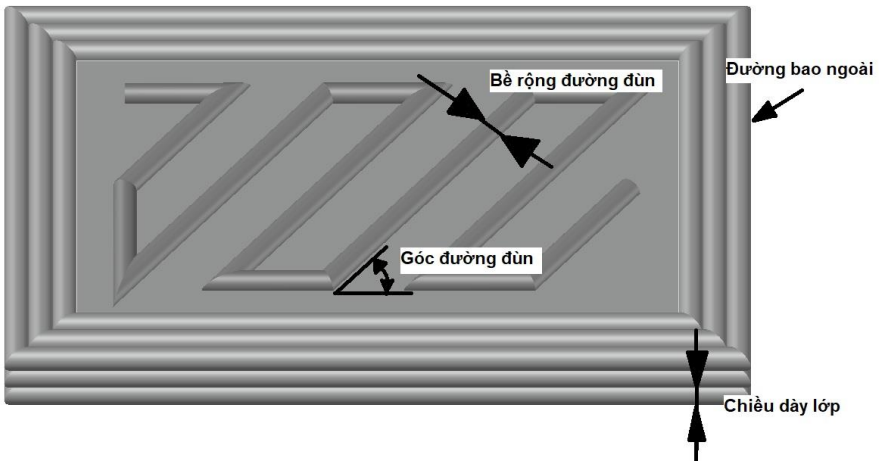
Ý nghĩa thực tiễn

- Kết quả nghiên cứu giúp cho các nhà chế tạo và sử dụng thiết bị FDM hiểu rõ hơn về ảnh hưởng của các thông số công nghệ, xác định được những yếu tố có thể kiểm soát nhằm cải thiện chất lượng sản phẩm, nâng cao hiệu quả trong quá trình hiệu chuẩn, sử dụng thiết bị phục vụ cho quá trình khai thác cũng như chế tạo thiết bị FDM công nghiệp tại Việt Nam.

CHƯƠNG 2 ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN CHẤT LƯỢNG SẢN PHẨM FDM

Chất lượng sản phẩm FDM chịu sự ảnh hưởng và có thể kiểm soát được bằng cách lựa chọn, điều chỉnh các thông số công nghệ trong quá trình chế tạo. Chương 2 trình bày về định nghĩa và nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ được lựa chọn trong phạm vi nghiên cứu của luận án gồm chiều dày lớp, góc đường đùn, tốc độ đầu đùn, nhiệt độ buồng tạo sản phẩm, hướng chế tạo, kiểu điền đầy, nhiệt độ đầu đùn, bề rộng đường đùn và số đường bao ngoài đến chất lượng của sản phẩm FDM. Cụ thể:

2.1 Chiều dày lớp (t)



Hình 2. 1 Các thông số: chiều dày lớp, góc đường đùn, bề rộng đường đùn, đường bao ngoài

Chiều dày lớp là độ dày một lớp (tính theo phương Z) trong quá trình chế tạo (hình 2.1) tương ứng với độ dày một mặt cắt của sản phẩm khi chia lớp trên phần mềm. Giá trị thông số chiều dày lớp phụ thuộc vào giá trị đường kính vòi phun, đường kính sợi vật liệu, loại vật liệu cụ thể và khả năng của thiết bị. Thông số chiều dày lớp ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác kích thước và độ

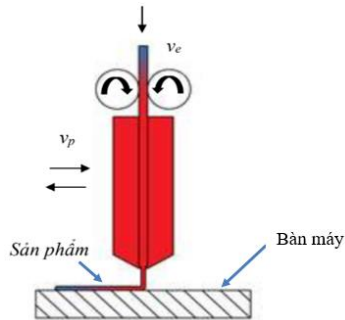
bền kéo của sản phẩm do ảnh hưởng đến độ bền liên kết giữa các lớp. Dựa các tài liệu khảo sát, kinh nghiệm vận hành cũng như khả năng của thiết bị thực nghiệm, giá trị chiều dày lớp khi thực nghiệm được chọn ở mức thấp (1) là 0,1 mm, mức cao (+1) là 0,3 mm và mức trung bình (0) là 0,2 mm.

2.2 Góc đường đùn (θ)

Là góc của đường nhựa được đùn ra so với trục X tính trong một lớp (hình 2.1), có giá trị từ $0^{\circ} \div 90^{\circ}$. Góc đường đùn là thông số quan trọng, đặc biệt đối với các sản phẩm có độ cong nhỏ. Tùy thuộc vào hướng của lực tác dụng mà góc đường đùn có thể ảnh hưởng đến sự phân bố lực tác dụng cấu trúc bên trong của chi tiết. Do đó, nó ảnh hưởng đến độ bền kéo của sản phẩm. Ngoài ra, nếu thiết lập thông số này không tốt có thể gây ra hiện tượng thiếu nhựa, không kết dính giữa lớp điền đầy và bề mặt ngoài của sản phẩm. Trong quá trình thực nghiệm, nhằm đánh giá ảnh hưởng của góc đường đùn đến mục tiêu, giá trị thông số này được chọn ở mức thấp (-1) là 0° , mức cao (+1) là 90° và mức trung bình (0) là 45°

2.3 Tốc độ đầu đùn (V_p)

Là tốc độ di chuyển của đầu đùn trong quá trình làm việc (V_p) và nó có mối quan hệ mật thiết với vận tốc cấp liệu (V_e), tức là tốc độ đẩy vật liệu ra khỏi đầu đùn như hình 2.2. Khi hai thông số này không phù hợp với nhau, đường vật liệu đùn ra sẽ bị đứt quãng do thiếu nhựa hoặc bị phình do thừa nhựa gây ảnh hưởng đến chất lượng của sản phẩm. Với giá trị phù hợp, tốc độ đầu đùn có thể làm giảm khuyết tật bên trong và tăng liên kết giữa các lớp từ đó cải thiện được độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm. Thông thường, sản phẩm sẽ có chất lượng tốt nhất khi giá trị tốc độ đầu đùn được thiết lập trong khoảng (40 ÷ 60) mm/s. Trong quá trình thực nghiệm, dựa trên kinh nghiệm vận hành máy, các nghiên cứu đã có, kết quả mô phỏng ở *chương 3* và tính toán ở *phụ lục 4*, giá trị tốc độ đầu đùn được chọn ở mức thấp (-1) là 40 mm/s, mức cao (+1) là 60 mm/s và mức trung bình (0) là 50 mm/s.



Hình 2.2 Tốc độ cấp liệu (v_e) và tốc độ đầu đùn (v_p)

2.4 Mật độ điền đầy (D)

Mật độ điền đầy để chỉ mức độ dày đặc bên trong của sản phẩm, tính bằng tỉ lệ phần trăm. Tỉ lệ điền đầy càng cao thì cấu trúc bên trong của sản phẩm càng đặc, làm giảm các khoảng trống, giúp cho các lớp và các sợi vật liệu liên kết với nhau chặt chẽ hơn [29]. Trong quá trình thực nghiệm, giá trị mật độ điền đầy được chọn trong khoảng điều chỉnh tối đa với giá trị ở mức thấp (-1) là 20%, mức cao (+1) là 60% và mức trung bình (0) là 40%.

2.5 Nhiệt độ bù đắp tạo sản phẩm (T_b)

Thiết bị FDM có nhiệt độ bù đắp giúp chất lượng mỗi lớp vật liệu tốt hơn, tăng khả năng liên kết giữa các lớp, giảm độ cong vênh, tách lớp trên sản phẩm. Theo các công trình nghiên cứu đã công bố cũng như quá trình thử nghiệm thực tế trên thiết bị thì giá trị nhiệt độ bù đắp tạo sản phẩm nằm trong khoảng từ $(50 \div 60)^\circ\text{C}$ sẽ cho chất lượng sản phẩm tốt nhất đối với vật liệu nhựa PLA-đồng và một số loại vật liệu khác. Vì vậy, trong thực nghiệm, các giá trị nhiệt độ bù đắp tạo sản phẩm được cài đặt ở mức thấp (-1) là 50°C , mức cao (+1) là 60°C và mức trung bình (0) là 55°C .

2.6 Hướng chế tạo

Hướng chế tạo là thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm. Đồng thời, thông qua quá trình thực nghiệm và các công trình nghiên cứu đã chỉ ra rằng hướng chế tạo theo phương mặt phẳng là tối ưu nhất nếu hình dạng của chi tiết không quá đặc biệt. Bởi vì khi chế tạo sản phẩm theo phương này sẽ tạo nên lớp nền vững chắc hơn dẫn đến sự ổn định trong quá trình làm việc, giúp sản phẩm có chất lượng cao hơn. Ngoài ra, khi chế tạo sản phẩm theo phương mặt phẳng cũng giúp giảm số lượng các lớp, giảm chu kì gia nhiệt - làm mát, từ đó giảm được sai số kích thước. Vì những lý do trên, hướng chế tạo trong nghiên cứu được chọn theo phương mặt phẳng.

2.7 Kiểu điền đầy

Có nhiều kiểu điền đầy khác nhau, mỗi kiểu có ưu nhược điểm khác nhau và có ảnh hưởng khác nhau đến độ bền kéo của sản phẩm. Trong nghiên cứu này, do hình dáng mẫu thử đơn giản và mục tiêu là khảo sát ảnh hưởng của các thông số thay đổi nên kiểu điền đầy được chọn là kiểu *Rectilinear* cho tất cả các mẫu thử nghiệm vì nó giúp rút ngắn quá trình chế tạo, ít tốn vật liệu và không có nhược điểm nào quá lớn.

2.8 Nhiệt độ đầu đùn

Sự thay đổi của thông số nhiệt độ đầu đùn ảnh hưởng đến hình dáng (theo tiết diện ngang) của sợi vật liệu khi vừa ra khỏi miệng vòi phun, khi nằm trên bàn máy hoặc nằm trên lớp đã được tạo ra ngay trước đó. Nhiệt độ đầu đùn ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước và độ bền kéo của sản phẩm. Dựa trên đề nghị của nhà sản xuất cũng như trong quá trình thực nghiệm, giá trị nhiệt độ đầu đùn cho vật liệu PLA-đồng được chọn là 190°C.

2.9 Bề rộng đường đùn

Thông số bề rộng đường đùn đảm bảo sự vững chắc của cấu trúc bên trong và cải thiện độ bền kéo sản phẩm. Dựa vào kết quả khảo sát các công trình nghiên cứu, giá trị bề rộng đường đùn được chọn là 0,4 mm để giảm thời gian chế tạo nhưng vẫn đảm bảo được độ kết dính, độ cứng vững của chi tiết.

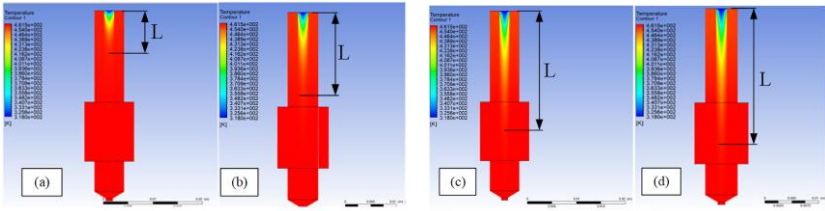
2.10 Số đường bao ngoài

Số đường bao ngoài càng nhiều càng làm tăng chiều dày thành, giúp sản phẩm tăng độ cứng vững và nó có ảnh hưởng đến cơ tính, độ chính xác kích thước. Số đường bao ngoài càng tăng sẽ giúp độ bền kéo tăng lên đáng kể. Tuy nhiên, khi tăng số đường bao ngoài lên quá nhiều các đường bao bên trong sẽ có nhiệt độ cao, do khó thoát nhiệt, làm tích lũy ứng suất dư gây ra sai lệch kích thước. Dựa theo các nghiên cứu đã tìm hiểu, số đường bao ngoài được chọn là 3 cho tất cả các mẫu thử nghiệm.

Qua phần trình bày trên cho thấy các thông số chiều dày lớp, góc đường đùn, tốc độ đầu đùn, nhiệt độ buồng tạo mẫu, hướng chế tạo, kiểu điền đầy, nhiệt độ đầu đùn, bề rộng đường đùn và số đường bao ngoài đều có ảnh hưởng đến mục tiêu đã lựa chọn vì chúng góp phần làm tăng độ cứng vững, giảm thiểu cong vênh, tách lớp và cải thiện độ liên kết giữa các sợi nhựa và các lớp với nhau.

CHƯƠNG 3 MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH ĐÙN NHỰA

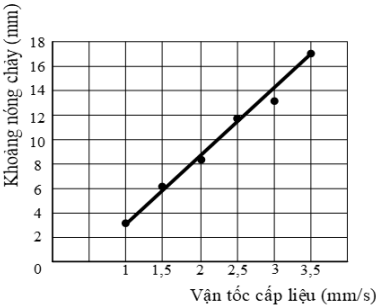
Thông số tốc độ đầu đùn (V_p) và vận tốc cấp liệu (V_c) có mối quan hệ mật thiết với nhau và có sự ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm FDM. Kết quả mô phỏng trong chương 3 cho phép đánh giá được mức độ ảnh hưởng của vận tốc cấp liệu đến miền áp suất, phân bố nhiệt độ và vận tốc sợi nhựa được đùn ra. Qua đó, xác định được khoảng giá trị vận tốc cấp liệu an toàn trong quá trình chế tạo sản phẩm và tính được khoảng giá trị cho thông số tốc độ đầu đùn. Các kết quả mô phỏng được trình bày trong các hình bên dưới như sau:



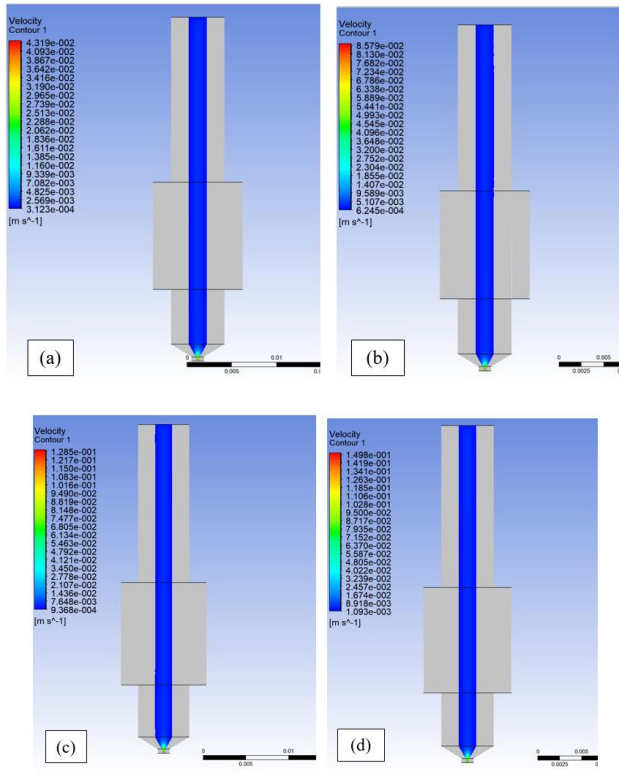
Hình 3.1 Khoảng nóng chảy hoàn toàn (L) của vật liệu nhựa PLA-đồng: (a) ở vận tốc cấp liệu 1mm/s; (b) ở vận tốc cấp liệu 2mm/s; (c) ở vận tốc cấp liệu 3mm/s và ở vận tốc cấp liệu 3,5 mm/s.

Bảng 3.1 Khoảng nóng chảy hoàn toàn của vật liệu nhựa PLA-đồng tương ứng với các vận tốc cấp liệu

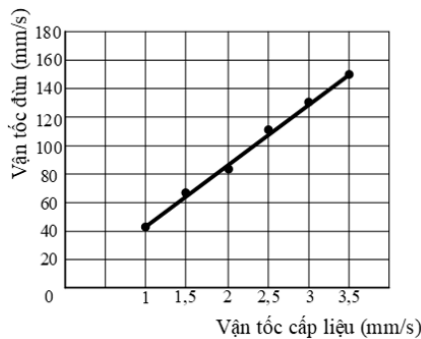
	Vận tốc cấp liệu (mm/s)					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Khoảng nóng chảy (mm)	3,17	6,22	8,5	11,3	13,6	16,9



Hình 3.2 Đồ thị khoảng nóng chảy hoàn toàn của vật liệu nhựa PLA-đồng



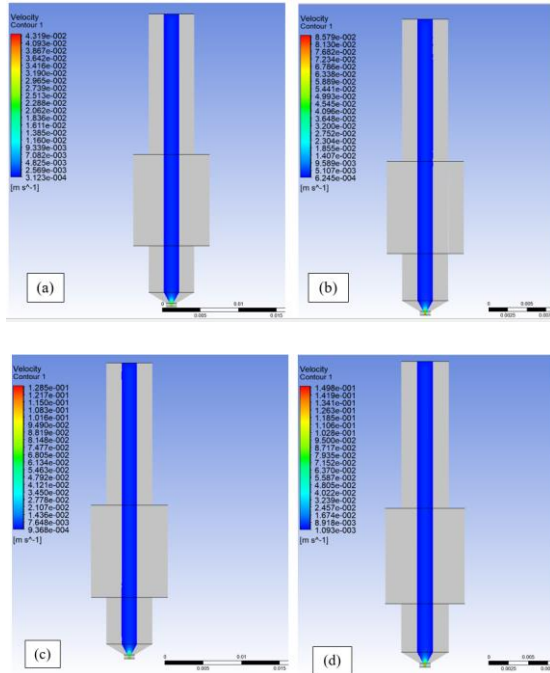
Hình 3.3 Ảnh hưởng của vận tốc cấp liệu đến tốc độ đùn vật liệu: (a) ở vận tốc cấp liệu 1mm/s; (b) ở vận tốc cấp liệu 2mm/s; (c) ở vận tốc cấp liệu 3mm/s và ở vận tốc cấp liệu 3,5 mm/s.



Hình 3.4 Đồ thị vận tốc đùn theo vận tốc cấp liệu của nhựa PLA-đồng

Bảng 3.2 Vận tốc đùn tương ứng với vận tốc cấp liệu

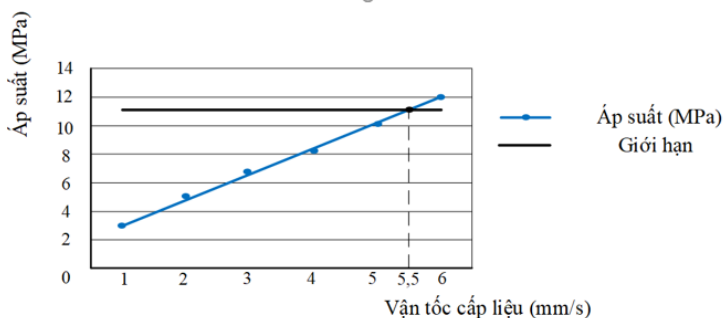
	Vận tốc cấp liệu (mm/s)					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Vận tốc đùn (mm/s)	43,19	64,45	85,79	107,1	128,5	149,8



Hình 3.5 Ảnh hưởng của vận tốc cấp liệu đến áp suất: (a) ở vận tốc cấp liệu 2 mm/s; (b) ở vận tốc cấp liệu 4 mm/s; (c) ở vận tốc cấp liệu 5,5 mm/s và ở vận tốc cấp liệu 6 mm/s.

Bảng 3.3 Các giá trị áp suất của PLA-đồng tại các vận tốc cấp liệu.

	Vận tốc cấp liệu (mm/s)					
	1	2	3	4	5	6
Áp suất (MPa)	2,88	4,38	6,88	8,65	10,34	11,97



Hình 3.6 Đồ thị vận tốc cấp liệu PLA-đồng và áp suất

Kết quả mô phỏng cho thấy:

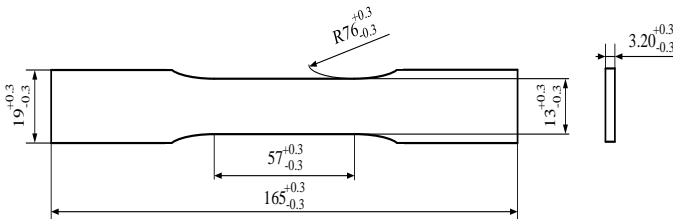
- Vận tốc cấp liệu càng tăng thì khoảng nóng chảy hoàn toàn càng dài (hình 3.1, hình 3.2, bảng 3.1). Khi khoảng nóng chảy này quá dài thì khả năng xảy ra tràn nhựa khi chế tạo càng lớn.
- Áp suất trong ống hóa lỏng tăng thì vận tốc cấp liệu tăng (hình 3.3, hình 3.4, bảng 3.2). Nếu vận tốc cấp liệu quá lớn sẽ tạo ra áp suất nén lớn làm cho sợi vật liệu bị bẻ cong. Để tránh hiện tượng này, giá trị vận tốc cấp liệu được kiến nghị dưới 5,5 mm/s.
- Vận tốc cấp liệu tăng sẽ làm tăng vận tốc đùn theo quan hệ tuyến tính và mức độ tăng là khá nhanh (hình 3.5, hình 3.6 bảng 3.3). Nếu vận tốc đùn quá lớn, dẫn đến tốc độ di chuyển của đầu đùn lớn sẽ xảy ra hiện tượng bàn máy rung lắc gây ồn và không đảm bảo chất lượng sản phẩm.

Từ kết quả trên, ta xác định được giá trị một thông số quan trọng trong quá trình thực nghiệm là *tốc độ đầu đùn nằm trong khoảng (40 ÷ 60) mm/s*.

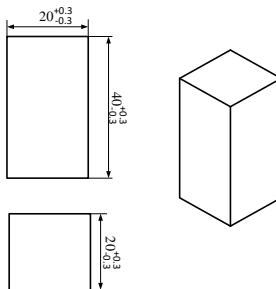
CHƯƠNG 4 THỰC NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH

Chương 4 trình bày về quá trình thực nghiệm theo phương pháp FCCCD thông qua mẫu thử bằng vật liệu nhựa PLA-đồng, chế tạo bằng thiết bị FDM Vina2015 có cụm cấp nhiệt cho buồng tạo sản phẩm. Các thông số đầu vào bao gồm: *chiều dày lớp (t)*, *vận tốc đầu đùn (V_p)*, *góc đường đùn (θ)*, *mật độ điện dây (D)* và *nhiệt độ buồng tạo sản phẩm (T_b)*. Các số liệu được thu thập, xử lý, phân tích để đánh giá ảnh hưởng của từng thông số công nghệ đến mục tiêu đầu ra và xây dựng mô hình thực nghiệm biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số đầu vào với từng mục tiêu đầu ra bao gồm: độ chính xác kích thước theo ba phương và độ bền kéo. Đồng thời, luận án cũng xây dựng mô hình dự đoán kết quả mục tiêu đầu ra dựa trên các thông số đầu vào bằng phương pháp ANN. Sau đó, tiến hành so sánh kết quả giữa phương pháp FCCCD và phương pháp ANN.

4.1 Chế tạo mẫu và thu thập số liệu:



Hình 4.1 Mẫu thử nghiệm độ bền kéo



Hình 4.2 Mẫu thử nghiệm độ chính xác kích thước

Độ lệch kích thước được tính theo công thức 4.1:

$$\Delta L_i = |\bar{L}_i - L_c| \quad (4.1)$$

Với: - \bar{L}_i : các giá trị trung bình đo trên mẫu theo phương X (\bar{X}_i), Y (\bar{Y}_i), Z (\bar{Z}_i)

- L_c : kích thước danh nghĩa của mẫu theo phương X (X_c), Y (Y_c), Z (Z_c).

- ΔL_i : sai số tuyệt đối của mẫu so với kích thước danh nghĩa theo phương X (ΔX_i), Y (ΔY_i), Z (ΔZ_i).

- i : số thứ tự của đối tượng đo.

Kết quả đo và độ lệch kích thước của các mẫu được trình bày ở bảng

4.1. Miền dung sai của phép đo (ε_a) được tính theo công thức 4.2

$$\varepsilon = 3 \times \bar{\sigma} \quad (4.2)$$

Với σ là trị số sai lệch trung bình, được tính theo công thức 4.3

$$\bar{\sigma} = \sigma / \sqrt{n} \quad n \text{ là số lần đo tại một vị trí đo (n = 3)} \quad (4.3)$$

với: - L_i là giá trị trung bình giữa ba lần đo, theo phương X là \bar{X} , theo phương Y là \bar{Y} và theo phương Z là \bar{Z} được trình bày trong bảng 4.1

- \bar{L}_i : là giá trị trung bình của 32 mẫu, theo phương X là (\bar{X}_i), theo phương Y là (\bar{Y}_i) và theo phương Z là (\bar{Z}_i) được trình bày trong bảng 4.1

- n : là số lượng mẫu đo ($n = 32$).

Thay các giá trị \bar{X} và \bar{X} vào công thức 4.3 ta có sai lệch trung bình theo phương X là: $\sigma_x = 0,12$, thay σ_x vào công thức 4.2 ta được $\bar{\sigma}_X = 0,07$. Theo công thức (4.2), miền dung sai theo phương X là $\varepsilon_X = 3 \times 0,07 = 0,21$

Thay các giá trị \bar{Y} , \bar{Y} vào công thức 4.3 ta có sai lệch trung bình theo phương Y là: $\sigma_y = 0,12$, thay σ_y vào công thức 4.3 ta được $\bar{\sigma}_Y = 0,07$. Theo công thức (4.2), miền dung sai theo phương Y là $\varepsilon_Y = 3 \times 0,07 = 0,21$

Thay các giá trị \bar{Z} , $\bar{\bar{Z}}$ vào công thức 4.3 ta có sai lệch trung bình theo phương Z là: $\sigma_z = 0,13$. Thay σ_z vào công thức 4.3 ta được $\bar{\sigma}_z = 0,08$. Theo công thức (4.2), miền dung sai theo phương Z là $\varepsilon_z = 3 \times 0,04 = 0,24$

Giá trị của các lần đo chỉ được ghi nhận khi nằm trong khoảng cho phép là $\bar{X}_i \pm \varepsilon_x$, $\bar{Y}_i \pm \varepsilon_y$, $\bar{Z}_i \pm \varepsilon_z$. Kết quả cho thấy giá trị của cả ba lần đo đều nằm trong miền giá trị cho phép. Các giá trị này được sử dụng trong quy hoạch thực nghiệm như bảng 4.1

Tiến hành kéo 32 mẫu thử ở nhiệt độ phòng trên thiết bị kiểm tra độ bền kéo DELTALAB. Chế độ kéo được thiết lập với tốc độ kéo 5 mm/phút và tải trọng 10 kN. Ứng suất kéo bằng lực kéo trên diện tích mặt cắt ngang của mẫu. Kết quả độ bền kéo được trình bày trong bảng 4.2

Tương tự như phần đo kích thước, sai lệch trung bình của độ bền kéo là: $\sigma = 5,74$, $\bar{\sigma}_{\text{kéo}} = 3,18$ và $\varepsilon_{\text{kéo}} = 3 \times 3,18 = 9,54$.

Giá trị của các lần đo chỉ được ghi nhận khi nằm trong khoảng cho phép là $\sigma_{ki} \pm \varepsilon_{\text{kéo}}$. Kết quả cho thấy giá trị đo đều nằm trong miền giá trị cho phép. Các giá trị này được sử dụng trong quy hoạch thực nghiệm như bảng 4.2.

Bảng 4.1 Kết quả đo kích thước theo phương X

STT	Vị trí 1	Vị trí 2	Vị trí 3	\bar{X}
1	19,54	19,40	19,47	19,47
2	19,83	19,79	19,83	19,82
3	19,68	19,61	19,63	19,64
4	19,85	19,79	19,78	19,81
5	19,64	19,62	19,59	19,62
6	19,74	19,63	19,67	19,68
7	19,58	19,43	19,40	19,47
8	19,87	19,79	19,75	19,80
9	19,67	19,52	19,57	19,59
10	19,77	19,79	19,75	19,77
11	19,73	19,61	19,74	19,69
12	19,87	19,87	19,87	19,87
13	19,77	19,75	19,73	19,75
14	19,85	19,73	19,74	19,77
15	19,83	19,63	19,68	19,71
16	20,12	20,01	20,02	20,05
17	19,52	19,52	19,51	19,52
18	19,99	19,91	19,89	19,93
19	19,78	19,75	19,74	19,76
20	19,67	19,67	19,69	19,68
21	19,73	19,62	19,68	19,68
22	19,66	19,59	19,63	19,63
23	19,57	19,57	19,60	19,58
24	19,81	19,84	19,90	19,85
25	19,97	19,82	19,86	19,88
26	19,85	19,87	19,84	19,85
27	19,77	19,72	19,76	19,75
28	19,84	19,77	19,77	19,79
29	19,85	19,83	19,78	19,82
30	19,79	19,74	19,81	19,78
31	19,87	19,85	19,83	19,85
32	19,84	19,76	19,80	19,80
Giá trị trung bình của 32 mẫu (\bar{X})				19,73

Bảng 4.1 (tiếp theo) Kết quả đo kích thước theo phương Y

STT	Vị trí 1	Vị trí 2	Vị trí 3	\bar{Y}
1	20,15	20,12	20,12	20,13
2	20,34	20,35	20,32	20,34
3	20,30	20,26	20,31	20,29
4	20,44	20,38	20,37	20,40
5	20,26	20,26	20,25	20,26
6	20,38	20,36	20,35	20,36
7	20,16	20,11	20,10	20,12
8	20,44	20,41	20,44	20,43
9	20,22	20,18	20,25	20,22
10	20,49	20,35	20,36	20,40
11	20,25	20,23	20,28	20,25
12	20,62	20,50	20,49	20,54
13	20,28	20,21	20,25	20,25
14	20,27	20,23	20,17	20,22
15	20,28	20,23	20,25	20,25
16	20,62	20,54	20,56	20,57
17	20,34	20,32	20,32	20,33
18	20,55	20,46	20,46	20,49
19	20,50	20,53	20,58	20,54
20	20,63	20,50	20,49	20,54
21	20,45	20,40	20,38	20,41
22	20,51	20,47	20,48	20,49
23	20,47	20,42	20,41	20,43
24	20,57	20,42	20,45	20,48
25	20,37	20,41	20,52	20,43
26	20,46	20,48	20,43	20,46
27	20,45	20,44	20,48	20,46
28	20,46	20,44	20,41	20,44
29	20,44	20,41	20,43	20,43
30	20,39	20,31	20,34	20,35
31	20,35	20,37	20,39	20,37
32	20,42	20,37	20,40	20,40
Giá trị trung bình của 32 mẫu (\bar{Y})				20,37

Bảng 4.1 (tiếp theo) Kết quả đo kích thước theo phương Z

STT	Vị trí 1	Vị trí 2	Vị trí 3	\bar{Z}
1	39,39	39,36	39,38	39,38
2	39,90	39,90	39,90	39,90
3	39,83	39,89	39,85	39,86
4	39,93	39,96	39,92	39,94
5	39,90	39,92	39,87	39,90
6	39,89	39,86	39,88	39,88
7	39,85	39,86	39,87	39,86
8	39,07	39,07	39,09	39,08
9	39,93	39,91	39,95	39,93
10	39,52	39,56	39,50	39,53
11	39,92	39,93	39,91	39,92
12	39,94	39,85	39,88	39,89
13	39,98	39,98	39,98	39,98
14	40,02	39,98	39,99	40,00
15	40,06	40,08	40,04	40,06
16	39,99	40,06	39,94	40,00
17	40,00	40,00	40,00	40,00
18	39,89	39,88	39,87	39,88
19	39,97	40,02	39,97	39,99
20	40,04	40,01	40,03	40,03
21	39,97	40,01	39,92	39,97
22	39,98	39,92	39,94	39,95
23	39,90	39,94	39,88	39,91
24	39,90	39,83	39,87	39,87
25	40,14	40,17	40,14	40,15
26	39,86	39,91	39,80	39,86
27	39,88	39,81	39,76	39,82
28	39,88	39,90	39,88	39,89
29	39,87	39,83	39,80	39,83
30	39,84	39,86	39,82	39,84
31	39,92	39,87	39,91	39,90
32	39,90	39,87	39,96	39,91
Giá trị trung bình của 32 mẫu (\bar{Z})				39,89

Bảng 4.2 Kết quả đo ứng suất kéo của mẫu

STT	Lực kéo đứt (kN)	Độ bền (MPa) (σ_k)
1	1,02	22,80
2	1,19	26,50
3	1,23	27,40
4	1,23	27,40
5	0,86	19,10
6	0,73	16,30
7	0,81	18,10
8	0,69	15,40
9	1,54	39,40
10	1,40	31,30
11	1,39	31,10
12	1,54	34,40
13	0,85	18,20
14	0,99	22,20
15	0,97	21,80
16	1,01	22,50
17	0,90	20,10
18	0,90	20,10
19	0,91	20,10
20	0,89	20,00
21	1,24	27,80
22	0,79	17,70
23	0,73	16,50
24	0,83	18,60
25	0,80	17,90
26	0,90	20,20
27	0,78	17,50
28	0,79	17,20
29	0,76	17,10
30	0,82	18,40
31	0,82	18,30
32	0,81	18,20
Giá trị trung bình của 32 mẫu (σ_k)		21,86

4.2 Kết quả thực nghiệm:

Kế hoạch thực nghiệm của luận án được thiết kế theo quy hoạch hỗn hợp đối xứng bậc hai dạng B (FCCCD), các điểm sao nằm ở tâm mỗi mặt của không gian giai thừa, do đó $\alpha = \pm 1$ (các ô màu xanh). Dữ liệu thực nghiệm thu được từ mô hình FCCCD được trình bày trong bảng 4.3

Bảng 4.6 Dữ liệu thực nghiệm thu được từ FCCCD

STT	Thông số					ΔX	ΔY	ΔZ	Độ bền kéo (MPa)
	T	V _p	θ	D	T _b				
1	-1	-1	-1	-1	1	0,53	0,13	0,62	22,80
2	1	-1	-1	-1	-1	0,18	0,34	0,1	26,50
3	-1	1	-1	-1	-1	0,36	0,29	0,24	27,40
4	1	1	-1	-1	1	0,19	0,4	0,16	27,40
5	-1	-1	1	-1	-1	0,38	0,26	0,1	19,10
6	1	-1	1	-1	1	0,32	0,36	0,12	16,30
7	-1	1	1	-1	1	0,53	0,12	0,14	18,10
8	1	1	1	-1	-1	0,2	0,42	0,92	15,40
9	-1	-1	-1	1	-1	0,41	0,22	0,17	39,40
10	1	-1	-1	1	1	0,23	0,4	1,47	31,30
11	-1	1	-1	1	1	0,31	0,25	0,08	31,10
12	1	1	-1	1	-1	0,13	0,54	0,11	34,40
13	-1	-1	1	1	1	0,25	0,25	0,02	18,20
14	1	-1	1	1	-1	0,23	0,22	0	22,20
15	-1	1	1	1	-1	0,29	0,25	0,06	21,80
16	1	1	1	1	1	0,05	0,57	0	22,50
17	-1	0	0	0	0	0,48	0,33	0	20,10
18	1	0	0	0	0	0,07	0,49	0,12	20,10
19	0	-1	0	0	0	0,24	0,54	0,01	20,10
20	0	1	0	0	0	0,32	0,54	0,03	20,00
21	0	0	-1	0	0	0,32	0,41	0,13	27,80
22	0	0	1	0	0	0,37	0,49	0,15	17,70
23	0	0	0	-1	0	0,42	0,43	0,19	16,50
24	0	0	0	1	0	0,15	0,48	0,13	18,60
25	0	0	0	0	-1	0,12	0,43	0,15	17,90
26	0	0	0	0	1	0,15	0,46	0,14	20,20
27	0	0	0	0	0	0,25	0,46	0,18	17,50
28	0	0	0	0	0	0,21	0,44	0,11	17,20
29	0	0	0	0	0	0,18	0,43	0,17	17,10
30	0	0	0	0	0	0,22	0,35	0,16	18,40
31	0	0	0	0	0	0,15	0,37	0,01	18,30
32	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,09	18,20

4.3 Kết quả phân tích số liệu

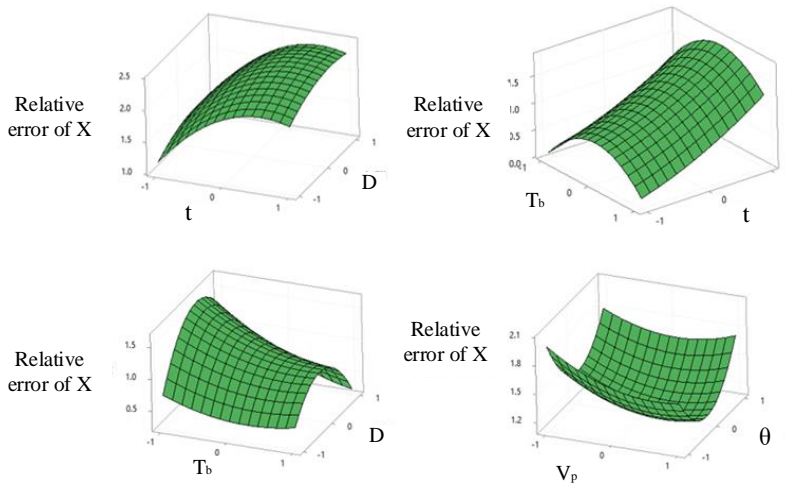
❖ Độ chính xác kích thước theo phương X

Mô hình hồi quy dự đoán sai số kích thước phương X theo các thông số đầu vào được xác định như sau:

$$\Delta X = 1,15 - 0,54 t - 0,3 D - 0,61 T_b^2 - 0,21 D \times T_b \quad (4.4)$$

Nhận xét:

Trên các đồ thị bề mặt hình 4.3 cho thấy chiều dày lớp (t), nhiệt độ buồng tạo sản phẩm (T_b) là những thông số có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác theo phương X. Khi chiều dày lớp nhỏ, giá trị nhiệt độ buồng thích hợp thì số lớp càng nhiều, nhiệt độ của các lớp trước đó càng tăng lên do sự truyền nhiệt, điều này làm tăng sự khuếch tán, tăng liên kết giữa các sợi, hạn chế độ cong vênh, tách lớp góp phần làm tăng độ chính xác của sản phẩm. Ngoài ra, thông số mật độ điện dày (D) cũng có ảnh hưởng lớn đến sai số kích thước theo phương X. Giá trị mật độ điện dày thích hợp sẽ làm cho sản phẩm tăng độ cứng vững, hạn chế cong vênh. Yếu tố tương tác giữa mật độ điện dày (D) và nhiệt độ buồng tạo sản phẩm (T_b) có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác kích thước.



Hình 4.3 Đồ thị bề mặt của sai số kích thước theo phương X

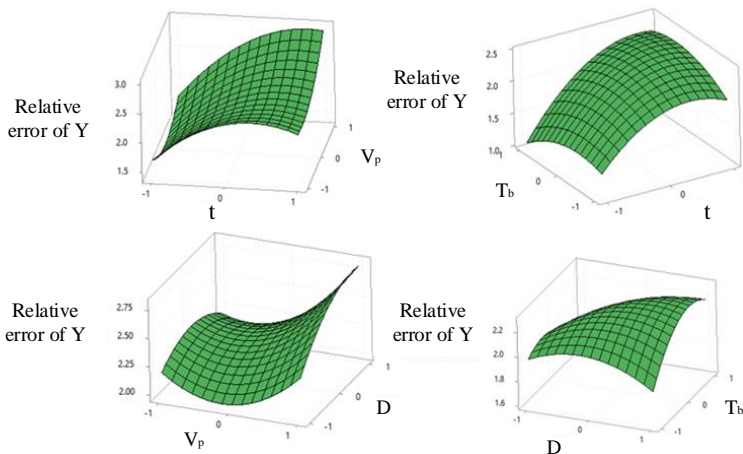
❖ Phân tích độ chính xác kích thước theo phương Y

Mô hình hồi quy dự đoán sai số kích thước phương Y theo các thông số đầu vào được xác định như sau:

$$\Delta Y = 2,26 + 0,46 t + 0,19 V_p + 0,17 t \times V_p + 0,17 D \times T_b \quad (4.5)$$

Nhận xét:

Từ các đồ thị bề mặt ở hình 4.4 có thể quan sát được rằng chiều dày lớp (t) thấp nhất sẽ cho sai số ít nhất. Tuy nhiên mối tương quan giữa chúng không tuân theo quy luật tuyến tính. Quan sát các đồ thị, ta có thể thấy sai số lớn nhất thường nằm ở vị trí có chiều dày lớp ở mức trung bình (0), tức là ở mức giá trị 0,2 mm. Mặt khác, ta có thể thấy ảnh hưởng của thông số tốc độ đầu đùn (V_p) cũng rất đáng kể. Sai số thấp nhất đạt được khi tốc độ đầu đùn nằm ở mức trung bình (0) tương ứng với giá trị 40 mm/s, điều này cũng cho thấy rằng việc chọn khoảng giá trị ban đầu cho thông số này là hợp lý. Tương tự như kích thước phương X, sự tương tác giữa mật độ điện chảy (D) và nhiệt độ buồng tạo sản phẩm (T_b), có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác kích thước phương Y.

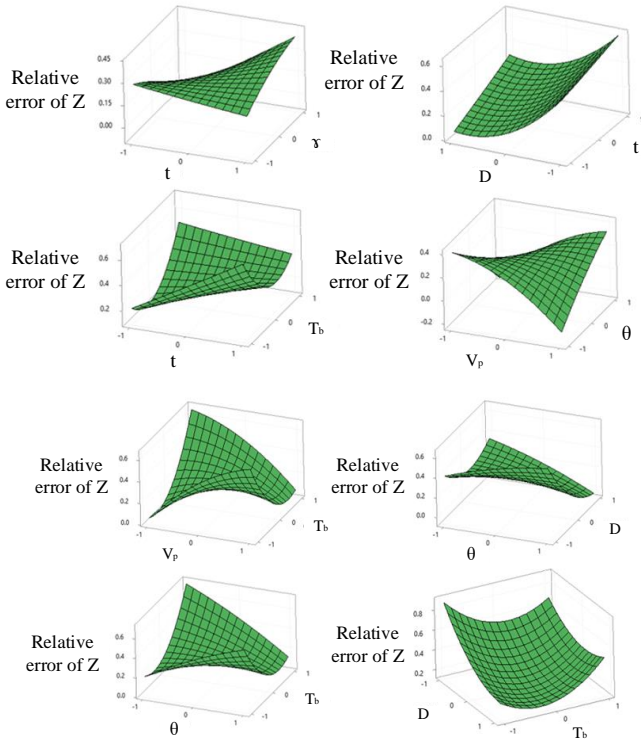


Hình 4.4 Đồ thị bề mặt của sai số kích thước theo phương Y

❖ Phân tích độ chính xác kích thước theo phương Z

Mô hình hồi quy dự đoán sai số kích thước phương Z theo các thông số đầu vào được xác định như sau:

$$\Delta Z = 0,23 + 0,1 T_b - 0,19 D + 0,27 \theta \times V_p - 0,3 \theta \times T_p - 0,16 V_p \times D - 0,25 V_p \times T_b + 0,14 t \times \theta - 0,15 t \times T_b + 0,12 t \times \theta + 0,1 D \times T_b - 0,1 \theta \times D \quad (4.6)$$



Hình 4.5 Đồ thị bề mặt của sai số kích thước theo phương Z

Nhận xét

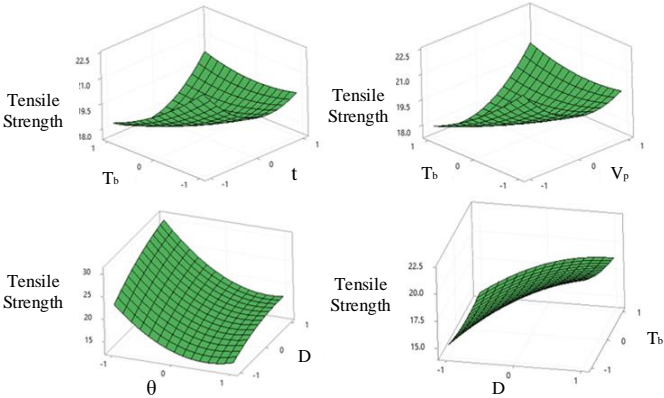
Trên đồ thị bề mặt hình 4.5, ta có thể quan sát được rằng với kích thước theo phương Z, sự ảnh hưởng của chiều dày lớp (t) không còn lớn như đối với kích thước phương X và phương Y. Điều này có thể được giải thích là nhờ vào ảnh hưởng của thông số nhiệt độ buồng tạo sản phẩm (T_b). Trên các thiết bị có buồng nhiệt, sự liên kết giữa các lớp sẽ tốt hơn, hạn chế được tình trạng cong vênh, nứt lớp, tách lớp, nhờ đó mà độ chính xác theo phương Z được cải thiện

rất nhiều. Mật độ điền đầy (D) là thông số có ảnh hưởng lớn đến kích thước Z của sản phẩm. Mật độ điền đầy cao giúp làm giảm hiện tượng bị sụt lún nhựa ở các lớp bề mặt trên của chi tiết, giúp tăng độ chính xác phương Z cho chi tiết. Ngoài ra, đối với kích thước phương Z, sự ảnh hưởng của các yếu tố tương tác là rất phức tạp, do đó ta phải điều chỉnh tỉ lệ của các yếu tố tương tác này một cách cẩn thận nếu muốn đạt độ chính xác cao hơn.

❖ **Phân tích độ bền kéo**

Mô hình hồi quy dự đoán độ bền kéo theo thông số đầu vào được xác định như sau:

$$\sigma_k = 18,26 - 5,38 V_p + 2,78 D - 09 T_b + 4,13 V_b^2 + 1,03 t \times T_b + 1,17 \theta \times T_b - 1,02 V_p \times D \tag{4.7}$$



Hình 4.6 Đồ thị bề mặt của độ bền kéo

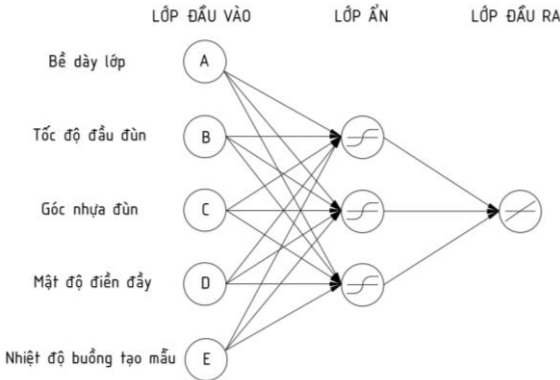
Nhận xét

Các đồ thị bề mặt của độ bền kéo ở hình 4.6 cho thấy góc đường đùn (θ) và mật độ điền đầy (D) là hai thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền kéo. Mật độ điền đầy (D) càng lớn thì độ bền kéo của sản phẩm càng cao. Với góc đường đùn ở mức thấp (-1) tương ứng với giá trị 0°, hướng chịu tải khi kéo sẽ song song với góc đường đùn, khi đó ta sẽ có độ bền kéo tốt nhất. Ngoài ra, nhiệt độ buồng tạo sản phẩm (T_b) cũng là thông số có ảnh hưởng lớn đến độ

bền kéo. Khi nhiệt độ buồng được duy trì ở mức phù hợp, sự liên kết giữa các lớp sẽ tốt hơn làm cho độ bền kéo tăng lên. Sự tương tác của chiều dày lớp (t) và tốc độ đầu đùn (V_p) với các thông số khác cũng cho sự ảnh hưởng rất lớn tới độ bền kéo.

4.4 Huấn luyện mô hình ANN

Mô hình ANN được xây dựng trong luận án với 5 thông số đầu vào gồm chiều dày lớp, vận tốc đầu đùn, góc đường đùn, mật độ điện đẩy và nhiệt độ buồng tạo mẫu và mục tiêu đầu ra gồm độ chính xác theo phương X, Y, Z và độ bền kéo (hình 4.6)



Hình 4.6 Cấu trúc mạng được xây dựng với một lớp ẩn

Quá trình huấn luyện mạng và kết quả huấn luyện cho sai số kích thước theo ba phương X, Y, Z và độ bền kéo cho thấy hệ số tương quan R cho quá trình huấn luyện và kiểm tra đều rất cao, điều này có nghĩa là mạng được huấn luyện tốt, mô hình dự đoán có mối tương quan rất chặt chẽ với dữ liệu.

4.5 So sánh giữa hai phương pháp RSM và ANN

Với mỗi đầu ra, ta có hai bộ dữ liệu dự đoán gồm dữ liệu dự đoán từ mô hình hồi quy và dữ liệu dự đoán được từ mô hình mạng ANN. Để so sánh và đánh giá giữa hai phương pháp này, người ta thường dùng chỉ số sai số tuyệt

đôi trung bình (MAE) của hai bộ dữ liệu so với dữ liệu thực tế bằng công thức 4.8

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} \quad (4.8)$$

Trong đó:

x: là giá trị của bộ dữ liệu từ RSM

y: là giá trị của bộ dữ liệu từ ANN

i: là số thứ tự các dữ liệu

n: là tổng số mẫu (trong trường hợp này là số mẫu thí nghiệm)

Kết quả so sánh MAE giữa hai phương pháp cho thấy MAE của mô hình ANN luôn nhỏ hơn MAE của mô hình hồi quy từ 2-3 lần. Điều này chứng tỏ mô hình ANN cho khả năng dự đoán kết quả chính xác hơn so với phương trình hồi quy có được từ phương pháp bề mặt đáp ứng. Tuy nhiên, mô hình ANN cần rất nhiều thời gian để huấn luyện mạng và số lượng dữ liệu đầu vào lớn, đồng thời mô hình ANN cũng không cung cấp khả năng tối ưu hóa thông số đầu vào như phương pháp bề mặt đáp ứng.

CHƯƠNG 5 TỐI ƯU HÓA THÔNG SỐ - KIỂM CHỨNG

Chương 5 trình bày quá trình tối ưu hóa các thông số công nghệ đầu vào cho các mục tiêu đầu ra gồm độ chính xác kích thước theo ba phương và độ bền kéo theo phương pháp đáp ứng bề mặt. Chế tạo lại mẫu từ các bộ thông số tối ưu tìm được, đo đạc, thu thập số liệu và từ đó đưa ra nhận xét, đánh giá.

5.1 Kết quả các bộ thông số tối ưu:

Bộ thông số tối ưu đa mục tiêu cho kích thước theo cả ba phương X, Y, Z

Thông số	t	θ	V_p	D	T_b
Giá trị mã hoá	-1	-0,17	0,47	1	-1
Giá trị thực	0,1 mm	48 mm/s	66 ⁰	60%	50 ^{0C}

Bộ thông số tối ưu cho độ bền kéo

Thông số	t	θ	V_p	D	T_b
Giá trị mã hoá	-1	-1	-1	1	-1
Giá trị thực	0,1 mm	40 mm/s	0 ⁰	60%	50 ^{0C}

Bộ thông số tối ưu đa mục tiêu cho độ chính xác và độ bền kéo

Thông số	t	θ	V_p	D	T_b
Giá trị mã hoá	1	-0,86	-1	0,88	-1
Giá trị thực	0,3 mm	41 mm/s	0 ⁰	59%	50 ^{0C}

5.2 Kiểm tra các bộ thông số tối ưu:

Kết quả kiểm tra bộ thông số tối ưu đa mục tiêu cho độ chính xác kích thước

STT	Thông số					Kết quả dự đoán			Kết quả thực nghiệm		
	t	θ	V_p	D	T_b	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
1	-1	-0,17	0,47	1	-1	1,11	1,02	0,05	1,62	1,32	0,07
<i>Quy đổi sang độ lệch so với kích thước danh nghĩa (mm)</i>						0,22	0,2	0,02	0,32	0,26	0,03

Nhận xét: Với bộ thông số tối ưu cho độ chính xác kích thước tìm được, sai số kích thước theo phương X, Y, Z đạt: 1,62%, 1,32% và 0,07% không có nhiều sai lệch so với kết quả của phương pháp RSM 1,11%, 1,02% và 0,05%.

Kết quả kiểm tra bộ thông số tối ưu cho độ bền kéo

Stt	Thông số					Kết quả dự đoán	Kết quả thực nghiệm
	t	θ	V_p	D	T_b	Độ bền kéo	Độ bền kéo
1	-1	-1	-1	1	-1	38,94 MPa	35,3 MPa

Nhận xét: Với bộ thông số tối ưu cho độ bền kéo tìm được ta có giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm gần như tương đương nhau. Điều này cho thấy kết quả dự đoán được có độ chính xác cao. Giá trị độ bền kéo của mẫu sau khi tối ưu đạt 35,3 MPa, tăng lên hơn 1,6 lần so với độ bền kéo trung bình của bộ mẫu thí nghiệm.

Kết quả kiểm tra bộ thông số tối ưu đa mục tiêu cho bộ thông số tổng hợp

STT	Thông số					Kết quả dự đoán				Kết quả thực nghiệm			
	t	θ	V_p	D	T_b	ΔX	ΔY	ΔZ	Bền kéo (MPa)	ΔX	ΔY	ΔZ	Bền kéo (MPa)
1	1	-0,86	-1	0,88	-1	0,63	0,66	0,91	35,39	0,27	0,25	0,71	35,5
Quy đổi sang độ lệch so với kích thước danh nghĩa (mm)						0,13	0,13	0,36	-	0,05	0,05	0,28	-

Nhận xét: Với bộ thông số tối ưu đồng thời cho độ chính xác và độ bền kéo tìm được, ta có thể thấy giá trị độ bền kéo đạt mức 35,5 MPa, cao hơn 1,6 lần so với độ bền trung bình của bộ mẫu thí nghiệm. Sai số kích thước phương X, Y, Z thực tế đạt 1,27%, 1,75% và 0,27%, gần như tương đương so với dự đoán 1,12%, 1,51%, 0,19%.

5.3 Thảo luận

Kết quả xác thực từ bộ gồm năm thông số công nghệ tối ưu (chiều dày lớp, tốc độ đầu đùn, góc đường đùn, mật độ điền đầy, nhiệt độ buồng tạo sản phẩm) cho thấy độ chính xác kích thước và độ bền kéo của các mẫu thử được cải thiện đáng kể. Độ sai lệch giữa giá trị tìm được theo phương pháp bề mặt đáp ứng và giá trị kiểm tra không nhiều. Kết quả này cho thấy phương pháp bề mặt đáp ứng và mô hình FCCCD được sử dụng trong luận án này có khả năng tối ưu tốt cho đồng thời nhiều mục tiêu đầu ra với độ chênh lệch giữa lý thuyết và thực tế tương đối nhỏ. Điều này chứng minh rằng mô hình thực nghiệm là hiệu quả và việc lựa chọn thông số, các mức giá trị thông số ban đầu là hợp lý. Quan sát các biểu đồ bề mặt từ hình 4.1 đến hình 4.3 có thể giải thích như sau:

Đối với độ chính xác kích thước:

- ❖ Trong năm thông số công nghệ, chiều dày lớp thể hiện là thông số có sự ảnh hưởng lớn nhất đến độ chính xác kích thước chung của sản

phẩm. Việc giảm giá trị chiều dày lớp sẽ làm cho các sợi nhựa và các lớp liên kết với nhau tốt hơn làm giảm biến dạng, cong vênh góp phần tăng độ chính xác kích thước.

- ❖ Thông số nhiệt độ bùồng tạo sản phẩm làm giảm sự chênh lệch nhiệt độ giữa các lớp, góp phần làm giảm ứng suất dư, hạn chế biến dạng, cong vênh.
- ❖ Ngoài ra, mật độ điền đầy lớn giúp cho sản phẩm đảm bảo độ cứng vững, hạn chế hiện tượng sụt lún trên bề mặt. Đồng thời, tốc độ đầu đùn thấp và chiều dày lớp nhỏ có thể làm giảm khuyết tật bên trong, tạo điều kiện thuận lợi cho sự liên kết giữa các lớp. Từ đó, góp phần đảm bảo độ chính xác kích thước chung của sản phẩm.

Đối với độ bền kéo:

- ❖ Trong năm thông số công nghệ, thông số góc đường đùn và mật độ điền đầy thể hiện sự ảnh hưởng lớn đến độ bền kéo. Với kết quả tối ưu của góc đường đùn tìm được là 0°C , hướng chịu tải sẽ song song với góc đường đùn khi đó độ bền kéo là tốt nhất. Với giá trị thông số mật độ điền đầy tìm được là 60%, khi đó, các khoảng hở bên trong sản phẩm sẽ nhỏ nhất, tạo điều kiện cho các sợi nhựa và các lớp liên kết tốt nhất, góp phần làm độ bền kéo tăng lên.
- ❖ Thông số nhiệt độ bùồng tạo sản phẩm cũng là thông số có ảnh hưởng lớn đến độ bền kéo. Đối với vật liệu nhựa PLA-đồng, giá trị nhiệt độ bùồng tạo sản phẩm ở mức 50°C làm giảm hiện tượng tách lớp, cải thiện độ liên kết giữa các lớp, các đường nhựa với nhau góp phần làm tăng độ bền kéo cho sản phẩm.

CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN

Chương 6 trình bày các kết quả đạt được của luận án bao gồm:

6.1 Kết quả đạt được

1. Xác định được ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ chính xác kích thước và độ bền kéo.
2. Các mô hình hồi quy biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với độ chính xác kích thước và độ bền kéo.
3. So sánh phương pháp ANN và RSM, từ đó đưa ra nhận xét, đánh giá.
4. Xác định được các bộ thông số tối ưu và kiểm chứng kết quả.

6.2 Những đóng góp mới của nghiên cứu

1. Mô hình hồi quy được xây dựng theo hướng đa mục tiêu (độ chính xác kích thước theo cả ba phương và độ bền kéo) với năm thông số đầu vào sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm bậc 2 (bề mặt đáp ứng RSM) của luận án giúp rút ngắn được quá trình thực nghiệm trong quá trình sử dụng và hiệu chuẩn thiết bị FDM.
2. Các bộ thông số tối ưu tìm được theo phương pháp bề mặt đáp ứng giúp cho quá trình vận hành thiết bị FDM chế tạo được sản phẩm thoả các tiêu chí về độ chính xác kích thước, độ bền kéo. Điều này đóng góp cho triển vọng phát triển ngành công nghiệp chế tạo sản phẩm bằng FDM cho doanh nghiệp vừa và nhỏ ở nước ta.
3. Việc sử dụng vật liệu PLA-đồng để nghiên cứu trong luận án góp phần mở rộng ứng dụng của công nghệ FDM trong lĩnh vực công nghiệp chế tạo, điện – điện tử...đồng thời góp phần mở ra tiềm năng ứng dụng các loại vật liệu này trong nhiều lĩnh vực khác tại Việt Nam.
4. Xây dựng được quy trình giúp cho quá trình kiểm định thiết bị FDM sản xuất tại Việt Nam trong tương lai.

6.3 Đề xuất

Bên cạnh những kết quả đạt được, luận án cũng đề xuất các mục tiêu nghiên cứu trong tương lai như sau:

1. Đánh giá và tối ưu thông số công nghệ của thiết bị FDM cho các đặc tính cơ học khác như: độ bền nén, độ bền uốn...trong đó, đặc biệt chú trọng đến thông số nhiệt độ buồng tạo sản phẩm.
2. Mở rộng phạm vi và mức giá trị của các thông số khi đánh giá ảnh hưởng đến các chỉ tiêu năng suất, chất lượng của sản phẩm FDM.
3. Sử dụng các loại vật liệu khác, đặc biệt là vật liệu tổng hợp đang và sẽ được sử dụng trong công nghệ FDM như: PLA-đồng, PLA-sắt, ABS-đồng, ABS-sắt, PLA-bột tre, PLA-gỗ....
4. Tăng số lượng mẫu cũng như mức giá trị khi xây dựng mô hình dự đoán theo phương pháp ANN, ANFIS, CNN...