

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



NGÔ QUANG TÚ

**KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ
THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ VÀ VẬT LIỆU ĐẾN CƠ TÍNH
CỦA CHI TIẾT IN 3D**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Hà Nội, 2025

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



NGÔ QUANG TÚ

**KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ
THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ VÀ VẬT LIỆU ĐẾN CƠ TÍNH
CỦA CHI TIẾT IN 3D**

Ngành: **Kỹ thuật cơ khí**

Mã ngành: 8520103

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. PGS.TS. HOÀNG TIẾN DŨNG

2. TS. TRỊNH VĂN LONG

Hà Nội, 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan số liệu và kết quả nhiên cứu trong đề án tốt nghiệp ***“Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số công nghệ và vật liệu đến cơ tính của chi tiết in 3d”*** là trung thực và chưa hề được sử dụng để bảo vệ một học viên nào. Mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện đề án tốt nghiệp này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong đề án tốt nghiệp đã được chỉ rõ nguồn gốc rõ ràng và được phép công bố.

Hà nội, ngày...tháng...năm 2025

Học viên thực hiện

Ngô Quang Tú

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
MỤC LỤC.....	ii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ TỪ VIẾT TẮT	iv
DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH	v
DANH MỤC BẢNG BIỂU	vii
GIỚI THIỆU	1
CHƯƠNG 1 - TỔNG QUAN VỀ IN 3D	5
1.1. TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC	5
1.1.1. Nghiên cứu trong nước	7
1.1.2. Nghiên cứu ngoài nước.....	8
1.2. TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI	9
1.3. CÁC THAM SỐ TRONG QUY TRÌNH IN	10
1.4. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN cứu.....	15
1.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1	18
CHƯƠNG 2 - CƠ SỞ LÝ THUYẾT	19
2.1. CƠ SỞ TOÁN HỌC	19
2.1.1. Mô tả mô hình nhiệt.....	19
2.1.2. Mô tả mô hình vật lý.....	22
2.2. TÌM HIỂU VỀ VẬT LIỆU IN 3D VÀ MỨC ĐỘ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ IN.	23
2.2.1. PLA (Polylactic Acid):	23
2.2.2. PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol):.....	28
2.2.3. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene):.....	32
2.3. THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP KIỂM TRA ỨNG SUẤT KÉO.....	37
2.3.1. Thiết bị kiểm tra ứng suất kéo	37
2.3.2. Phương pháp kiểm tra ứng suất kéo theo tiêu chuẩn ASTM D638.....	41
2.3.3. Phân tích kết quả thí nghiệm	44
2.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2	44

CHƯƠNG 3 - THÍ NGHIỆM VÀ XỬ LÝ SỐ LIỆU	46
3.1. THIẾT KẾ MA TRẬN THÍ NGHIỆM.	46
3.1.1. Vật liệu PLA.....	46
3.1.2. Vật liệu PETG.....	46
3.1.3. Vật liệu ABS.....	47
3.2. THU TẬP VÀ XỬ LÝ SỐ LIỆU.....	48
3.2.1. Vật liệu PLA.....	48
3.2.2. Vật liệu PETG.....	49
3.2.3. Vật liệu ABS.....	50
3.3. PHÂN TÍCH SỐ LIỆU.....	52
3.3.1. Vật liệu PLA.....	52
3.3.2. Vật liệu PETG.....	56
3.3.3. Vật liệu ABS.....	61
3.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3.....	65
KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA ĐỀ TÀI	67
❖ Kết luận chung:.....	67
❖ Hướng phát triển đề tài:	68
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	69
PHỤ LỤC.....	64

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ TỪ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
AM	Additive Manufacturing	Công nghệ sản xuất bồi đắp
CAD	Computer-Aided Design	Thiết kế hỗ trợ bằng máy tính
CAM	Computer-Aided Manufacturing	Sản xuất hỗ trợ bằng máy tính
CNC	Computer Numerical Control	Điều khiển số bằng máy tính
DLP	Digital Light Processing	Xử lý ánh sáng kỹ thuật số
FDM	Fused Deposition Modeling	Mô hình hóa bằng cách đùn nóng
FFF	Fused Filament Fabrication	Gia công bằng sợi nóng chảy
GF	Glass Fiber	Sợi thủy tinh
PLA	Polylactic Acid	Nhựa sinh học PLA
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol	Nhựa tái chế PETG
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	Nhựa khó phân huỷ ABS

DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH

Hình 1. Quy mô thị trường in 3D tại Bắc Mỹ theo từng công nghệ từ năm 2020 đến năm 2030[2]	1
Hình 1.1. Quy trình nghiên cứu	10
Hình 1.2. Sơ đồ công nghệ in 3D FDM	11
Hình 1.3. Góc raster trong mẫu in.....	12
Hình 1.4. Kích thước lỗ đầu in phổ biến.....	13
Hình 1.5. Kiểu cấu trúc và tỷ lệ điền đầy trên phần mềm CURA	13
Hình 1.6. Định hướng của mẫu vật	15
Hình 2.1. Mô tả mô hình nhiệt	19
Hình 2.2. Mô tả mô hình vật lý.	22
Hình 2.3. Ảnh hưởng của góc raster trên PLA (a) độ bền kéo, (b) Mô đun đàn hồi và (c) % độ giãn dài.	24
Hình 2.4. (a) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp (mm) với các mẫu lấp đầy khác nhau, (b) Độ nhạy của độ bền PLA với độ dày lớp với các tốc độ đùn khác nhau (mm/giây) và (c) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp với các góc raster khác nhau (tính theo độ).....	25
Hình 2.5. (a) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp (mm) với các mẫu lấp đầy khác nhau, (b) Độ nhạy của độ bền PLA với độ dày lớp với các tốc độ đùn khác nhau (mm/giây) và (c) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp với các góc raster khác nhau (tính theo độ).....	26
Hình 2.6. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho PLA cùng với các thiết lập liên quan.	27
Hình 2.7. PETG (a) sức mạnh và (b) Độ nhạy mô đun đàn hồi với nhiều góc raster khác nhau (tính theo độ).....	28
Hình 2.8. PETG (a) kéo và (b) độ nhạy về độ bền uốn đối với các độ dày lớp khác nhau với tốc độ in khác nhau (tính bằng mm/giây).	29
Hình 2.9. PETG (a) độ bền kéo và (b) Độ nhạy mô đun Young đối với độ dày lớp với các góc raster khác nhau (tính bằng độ).	29

Hình 2.10. Tác động của tỷ lệ lấp đầy với các hình dạng mẫu khác nhau trên (a) UTS và (b) độ nhám bề mặt	30
Hình 2.11. PETG (a) sức mạnh và (b) Độ nhảy mô đun Young với tốc độ in ở các góc raster khác nhau (tính bằng độ).	31
Hình 2.12. Ảnh hưởng tương đối của thông số quy trình đến tính chất cơ học của PETG.....	32
Hình 2.13. Tác động của góc quét lên các tính chất cơ học khác nhau (a,b) của ABS.	33
Hình 2.14. (a) Độ nhảy của độ bền kéo ABS với độ dày lớp với các góc quét khác nhau (tính bằng độ) và (b) với các tỷ lệ lấp đầy khác nhau (tính theo %)	34
Hình 2.15. Tác động của các tỷ lệ lấp đầy khác nhau lên các đặc tính khác nhau của ABS trong (a,b)	35
Hình 2.16. Độ nhảy tuổi thọ mỏi của ABS đối với tốc độ in với các mẫu in và đường kính vòi phun khác nhau của (a) 0,3 mm và (b) 0,5mm.	36
Hình 2.17. Ảnh hưởng tương đối của thông số quy trình đến tính chất cơ học của ABS	37
Hình 2.18. Máy in 3D Anycubic mega S	38
Hình 2.19. Máy in 3D Creality K1C	38
Hình 2.20. Máy BESTUTM 050MD	40
Hình 2.21. Mẫu thử	41
Hình 2.22. Máy thử nén/kéo vạn năng BESTUTM 050MD - Công suất tải tối đa 50kN.	42
Hình 2.23. Biểu đồ thể hiện quá trình kéo mẫu trên phần mềm mẫu 22	43
Hình 3.1. Mẫu thử nghiệm kéo với vật liệu PLA.....	49
Hình 3.2 Mẫu thử nghiệm kéo với vật liệu PETG	50
Hình 3.3. Mẫu thử nghiệm kéo với vật liệu ABS	51
Hình 3.4. Biểu đồ Main Effects	52
Hình 3.5. Biểu đồ Interaction Effects	53
Hình 3.6. Biểu đồ Pareto	54

Hình 3.7. Bảng hồi quy	55
Hình 3.8. Biểu đồ Main Effects Plot.....	56
Hình 3.9. Biểu đồ Interaction Plot	57
Hình 3.10. Biểu đồ Pareto	58
Hình 3.11. Bảng hồi quy	59
Hình 3.12. Response Optimization: Tr	60
Hình 3.13. Kết quả thử nghiệm với mẫu thử tối ưu	61
Hình 3.14. Biểu đồ Main Effects Plot.....	62
Hình 3.15. Biểu đồ Interaction Plot	63
Hình 3.16. Biểu đồ Pareto	63
Hình 3.17. Bảng hồi quy	64

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Một số đặc điểm chính của các nhóm công nghệ in 3D phổ biến.....	7
Bảng 1.2. Đặc tính cơ học và đặc điểm in của các vật liệu FDM khác nhau.....	14
Bảng 2.1. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho PLA cùng với các thiết lập liên quan.	27
Bảng 2.2. Bảng xếp hạng các thông số theo mức độ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của PLA được xác định bằng ANOVA.....	27
Bảng 2.3. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho vật liệu PETG cùng với các cài đặt liên quan	31
Bảng 2.4. Bảng xếp hạng các thông số theo mức độ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của PETG được xác định bằng ANOVA.	32
Bảng 2.5. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho ABS cùng với các cài đặt liên quan.	36
Bảng 2.6. Bảng xếp hạng các thông số theo mức độ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của ABS được xác định bằng ANOVA.	37
Bảng 2.7. Bảng thông số kỹ thuật của máy in.....	39

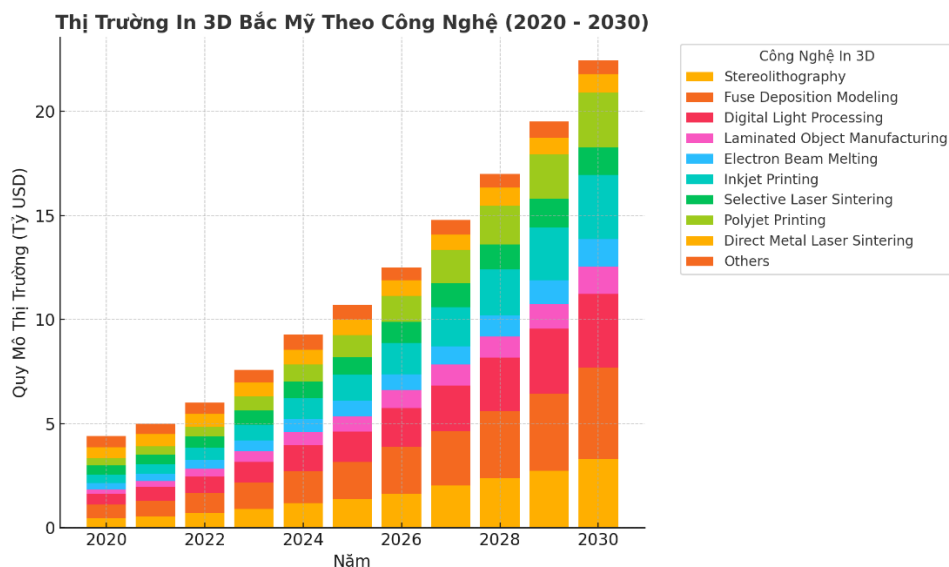
Bảng 3.1. Các tham số đầu vào của vật liệu PLA được sắp xếp theo phương pháp thí nghiệm Box-Behnken.....	46
Bảng 3.2. Các tham số đầu vào của vật liệu PETG được sắp xếp theo phương pháp thí nghiệm Box-Behnken	47
Bảng 3.3. Các tham số đầu vào của vật liệu ABS được sắp xếp theo phương pháp thí nghiệm Box-Behnken	47
Bảng 3.4. Ma trận thí nghiệm Box-Behnken và kết quả với vật liệu PLA	48
Bảng 3.5. Ma trận thí nghiệm Box-Behnken và kết quả với vật liệu PETG.....	49
Bảng 3.6. Ma trận thí nghiệm Box-Behnken và kết quả với vật liệu ABS.....	50
Bảng 3.7. Thông số tối ưu hóa quá trình in 3D vật liệu PETG.....	61

GIỚI THIỆU

❖ Lý do chọn đề tài

➤ Xu hướng phát triển của công nghệ in 3D

Thị trường in 3D toàn cầu đang phát triển với tốc độ ấn tượng và nhiều lĩnh vực đã ứng dụng công nghệ mới này. In 3D giúp giải quyết nhiều vấn đề khó mà các phương pháp gia công truyền thống không giải quyết được hoặc không hiệu quả vì dụ như tạo ra những cấu trúc nhẹ hơn, gia công chi tiết thành mỏng[1], gia công chi tiết có độ phức tạp cao,... Theo báo cáo từ Grand View Research, quy mô thị trường in 3D toàn cầu được định giá khoảng 22 tỷ USD vào năm 2023 và dự kiến sẽ tiếp tục tăng trưởng với tốc độ CAGR (Tỷ lệ tăng trưởng hằng năm) hơn 23% từ 2024 đến 2030. Điều này phản ánh sự gia tăng đáng kể của công nghệ in 3D trong các ngành công nghiệp quan trọng như hàng không, ô tô, và y tế[2][3]



Bảng 1. Quy mô thị trường in 3D tại Bắc Mỹ theo từng công nghệ từ năm 2020 đến năm 2030[2]

Đây là biểu đồ minh họa quy mô thị trường in 3D tại Bắc Mỹ theo từng công nghệ từ năm 2020 đến năm 2030, với đơn vị là tỷ USD. Biểu đồ cho thấy sự tăng trưởng mạnh mẽ của thị trường, từ 4.4 tỷ USD năm 2020 lên khoảng 22 tỷ USD vào năm 2030[2].

Các công nghệ in 3D được thể hiện bao gồm: Stereolithography, Fuse Deposition Modeling, Digital Light Processing, Laminated Object Manufacturing, Electron Beam Melting, Inkjet Printing, Selective Laser Sintering, Polyjet Printing, Direct Metal Laser Sintering, Others.

Biểu đồ này cho thấy sự tăng trưởng nhanh chóng của nhiều công nghệ in 3D khác nhau trong thập kỷ tới, với Fuse Deposition Modeling (FDM) và Stereolithography là những công nghệ phát triển mạnh mẽ nhất.

➤ **Thách thức và tính cấp thiết của đề tài**

Công nghệ in 3D, đặc biệt là công nghệ FDM (Fused Deposition Modeling), đang ngày phổ biến nhờ khả năng chế tạo sản phẩm nhanh chóng và linh hoạt. Tuy nhiên, thách thức lớn hiện nay là thiếu hụt thông tin đầy đủ về tính chất cơ học của các loại vật liệu in 3D và các chế độ công nghệ tối ưu. Sự thiếu hụt này không chỉ làm hạn chế khả năng mô hình hóa chính xác sản phẩm in 3D mà còn ảnh hưởng đến phân tích, đánh giá các cấu trúc in 3D trong thực tế.

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào khảo sát từng yếu tố riêng lẻ như: Góc in (Printing Angle), Độ dày lớp (Layer Thickness)[4], Nhiệt độ đầu in (Printing Temperature), Loại vật liệu (Material Type)[5], Tốc độ in (Printing Speed), Hướng in (Printing Orientation)[6].

Mặc dù các yếu tố này đã được nghiên cứu, nhưng tác động đa yếu tố đến cơ tính của sản phẩm in 3D vẫn chưa được hiểu rõ. Điều này dẫn đến sự thiếu nhất quán về chất lượng sản phẩm in, khi cùng một thiết kế có thể cho ra các kết quả khác nhau về độ bền cơ học tùy thuộc vào cách cài đặt các tham số in 3D. Vì vậy, việc lựa chọn đúng tham số in không chỉ cải thiện hiệu suất sản xuất, mà còn giúp giảm thời gian in và tiết kiệm vật liệu, từ đó tối ưu hóa sản xuất và giảm chi phí.

Tuy nhiên, việc thiết lập tham số không đúng có thể dẫn đến biến động về cơ tính của sản phẩm, điều này đặc biệt quan trọng khi các yêu cầu về độ bền và khả năng chịu lực của sản phẩm cần được đảm bảo. Hiện nay, vẫn còn rất ít nghiên cứu tổng hợp các yếu tố công nghệ như nhiệt độ in, tốc độ in, độ dày lớp, và nhiệt độ bàn in ảnh hưởng tổng thể đến tính chất cơ học của sản phẩm in 3D bằng công nghệ FDM.

Chính vì vậy, "KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ VÀ VẬT LIỆU ĐẾN CƠ TÍNH CỦA CHI TIẾT IN 3D" là đề tài cấp thiết trong bối cảnh hiện nay. Đề tài sẽ giúp cung cấp cái nhìn tổng quan về cách các yếu tố công nghệ in 3D tương tác và ảnh hưởng đến độ bền kéo và tính linh hoạt của sản phẩm. Thông qua việc tối ưu hóa các tham số này, chúng ta có thể không chỉ nâng cao chất lượng sản phẩm mà còn thúc đẩy sự ứng dụng rộng rãi của công nghệ in 3D FDM trong nhiều lĩnh vực công nghiệp, kỹ thuật và y học.

❖ Tổng quan nghiên cứu

Đề tài này trình bày về ảnh hưởng của các tham số in 3D đối với sức bền của các bộ phận được sản xuất. Các bài kiểm tra sức bền đã được thực hiện trên mẫu theo tiêu chuẩn ASTM D638-14, type I[7]. Các mẫu được in bằng công nghệ FDM từ ba vật liệu khác nhau, đó là PLA (vật liệu sinh học dễ phân hủy), PETG (vật liệu tái chế) và ABS (khó tái chế và khó phân hủy tự nhiên). Các mẫu được thử nghiệm ở các chế độ in khác nhau. Một loạt các thử nghiệm chịu tải tĩnh đã được thí nghiệm để xác định sức bền của các mẫu được tạo ra với các tham số in khác nhau. Nhờ vào kết quả thử nghiệm thu được, có thể lựa chọn các tham số in tối ưu tùy thuộc vào dự đoán tải trọng của các bộ phận được sản xuất

❖ Mục tiêu của đề tài

- Nghiên cứu tập trung vào việc đánh giá và hiểu rõ ảnh hưởng của các thông số công nghệ và vật liệu đối với cơ tính của chi tiết in 3D
- Lựa chọn được các tham số in tối ưu tùy thuộc vào dự đoán tải trọng của các bộ phận được sản xuất.

❖ Nội dung nghiên cứu

- Nghiên cứu tổng quan về phương pháp in 3D FDM
- Nghiên cứu tổng quan về vật liệu in FDM
- Khảo sát ảnh hưởng của một số thông số công nghệ và vật liệu đến cơ tính của chi tiết in 3D

❖ Phương pháp nghiên cứu

Kết hợp giữa nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đồng thời sử dụng các công cụ thiết kế thí nghiệm, phân tích số liệu và mô phỏng trên máy tính để đưa ra các kết luận.

CHƯƠNG 1 - TỔNG QUAN VỀ IN 3D

1.1. TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC

Công nghệ sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing - AM), hay còn gọi là in 3D, đã và đang trở thành một trong những phương pháp sản xuất cách mạng hóa quy trình chế tạo hiện đại. Khác biệt cơ bản so với các phương pháp gia công truyền thống là ở chỗ AM xây dựng vật thể ba chiều theo nguyên lý cộng dồn lớp vật liệu từng bước từ mô hình thiết kế CAD, thay vì loại bỏ vật liệu từ một phôi ban đầu. Điều này cho phép chế tạo các sản phẩm có hình học phức tạp, giảm đáng kể lượng phế thải và thời gian đưa sản phẩm ra thị trường.

Từ khi công nghệ in 3D đầu tiên ra đời vào giữa những năm 1980 với sự phát minh của phương pháp quang trùng hợp (SLA) bởi Charles Hull, AM đã phát triển nhanh chóng và hiện bao gồm nhiều kỹ thuật. Các công nghệ in 3D hiện nay rất đa dạng, được phân loại chủ yếu dựa trên nguyên lý tạo lớp vật liệu và phương pháp liên kết vật liệu. Theo tiêu chuẩn ASTM F2792 do Ủy ban ASTM F42 đề xuất, các công nghệ sản xuất bồi đắp được chia thành bảy nhóm chính:

- **Material Extrusion:** Kỹ thuật phổ biến nhất thuộc nhóm này là Fused Deposition Modeling (FDM), trong đó sợi nhựa nhiệt dẻo được nung chảy và đùn qua đầu phun để tạo lớp. Đây là phương pháp có chi phí thấp, dễ vận hành và phù hợp cho nhiều loại vật liệu như PLA, ABS, PETG, và các vật liệu composite nền polymer.
- **Vat Photopolymerization:** Sử dụng chất lỏng nhựa cảm quang (photopolymer) được làm cứng từng lớp bằng nguồn sáng (laser hoặc DLP). Kỹ thuật nổi bật là Stereolithography (SLA) và Digital Light Processing (DLP). Nhóm này cho độ phân giải rất cao, phù hợp với ứng dụng trong nha khoa, trang sức và mô hình hóa chi tiết.
- **Powder Bed Fusion (PBF):** Sử dụng nguồn nhiệt (laser hoặc electron beam) để nung chảy và kết dính từng lớp bột vật liệu (kim loại, polymer hoặc gốm). Các kỹ thuật như Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), và Electron Beam Melting (EBM) đều thuộc nhóm này. Công nghệ

PBF được sử dụng phổ biến trong sản xuất các chi tiết kim loại chịu tải cao trong ngành hàng không và y sinh.

- **Binder Jetting:** Một chất kết dính dạng lỏng được phun lên từng lớp bột để cố định hình dạng trước khi đem đi xử lý nhiệt. Phương pháp này phù hợp với kim loại, cát, và gốm; mang lại tốc độ chế tạo nhanh và chi phí thấp, nhưng cần hậu xử lý để đạt độ bền cao.
- **Material Jetting:** Tương tự như máy in phun màu, công nghệ này phun vật liệu nhựa hoặc sáp từng giọt lên bề mặt và làm cứng bằng đèn UV. Ưu điểm là khả năng in đa vật liệu và màu, tuy nhiên chi phí vật liệu rất cao và giới hạn về cơ tính.
- **Sheet Lamination:** Sử dụng lớp vật liệu dạng tấm (giấy, kim loại, polymer) cắt theo hình dạng lớp và liên kết với nhau bằng keo hoặc hàn. Công nghệ này ít phổ biến nhưng có chi phí thấp và tốc độ cao cho mô hình hóa lớn.
- **Directed Energy Deposition (DED):** Áp dụng phổ biến trong công nghiệp nặng và sửa chữa chi tiết, DED sử dụng chùm năng lượng mạnh (laser, electron beam hoặc plasma arc) để nung chảy vật liệu được cấp dạng dây hoặc bột trực tiếp vào vùng gia công. Đây là công nghệ then chốt trong lĩnh vực đắp vật liệu kim loại, đặc biệt là hợp kim titan và thép không gỉ.

Việc lựa chọn công nghệ phù hợp phụ thuộc vào loại vật liệu, yêu cầu kỹ thuật, chi phí đầu tư và ứng dụng mục tiêu. Đối với nghiên cứu này, công nghệ FDM được chọn làm nền tảng do khả năng mở rộng, tương thích cao với nhiều vật liệu và phù hợp với hướng phát triển máy in 3D giá thành hợp lý nhưng đa chức năng.

Công nghệ in 3D FDM (Fused Deposition Modeling) đang trở thành một phương pháp phổ biến trong sản xuất, phát triển sản phẩm (R&D), đặc biệt khi sử dụng các vật liệu như PLA, PETG và ABS. Các nghiên cứu trong và ngoài nước đã tập trung vào việc cải thiện các tính chất cơ học của sản phẩm in từ các vật liệu này, trong đó ứng suất kéo là chỉ số được quan tâm đặc biệt. Song song với đó, các nghiên cứu còn tập trung vào việc tiết kiệm năng lượng thông qua việc tối ưu hóa các thông số in như nhiệt độ đầu in, nhiệt độ bàn in, tốc độ in và tỷ lệ điền đầy.

Bảng 1.1 dưới đây tóm tắt một số đặc điểm chính của các nhóm công nghệ in 3D phổ biến:

Bảng 1.1. Một số đặc điểm chính của các nhóm công nghệ in 3D phổ biến

Nhóm công nghệ	Vật liệu điển hình	Ưu điểm chính	Ứng dụng tiêu biểu
FDM	PLA, ABS, PETG, PLA-CF	Chi phí thấp, dễ sử dụng	Giáo dục, mô hình, sản phẩm nhựa
SLA/DLP	Nhựa quang hóa	Độ phân giải cao, bề mặt mịn	Nha khoa, trang sức, mẫu mỹ thuật
SLS/SLM/EBM (PBF)	Kim loại, polyamide	Độ bền cơ học cao, dùng được trong sản xuất	Hàng không, y sinh, khuôn kim loại
Binder Jetting	Kim loại, cát, gốm	Nhanh, in nhiều mẫu cùng lúc	Khuôn cát, chế tạo nhanh
DED	Hợp kim, dây kim loại	Đắp lớp lớn, sửa chữa chi tiết	Công nghiệp nặng, hàng không

1.1.1. Nghiên cứu trong nước

Tại Việt Nam, công nghệ in 3D vẫn đang trong giai đoạn phát triển, nhưng đã có những tiến bộ đáng kể. Một số nghiên cứu đã tập trung vào việc tối ưu hóa các thông số in 3D để cải thiện cơ tính của sản phẩm, đặc biệt là độ bền kéo của các mẫu in từ PLA, PETG và ABS.

- Tran Anh Son và cộng sự (2020) thuộc Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM, Đại học Quốc gia TP.HCM và Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM đã tiến hành nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của ba thông số chính—loại vật liệu (PLA, PETG, ABS), mật độ lấp đầy và kiểu cấu trúc điền đầy—đến độ bền kéo của chi tiết in 3D bằng công nghệ FDM. Kết quả cho thấy loại vật liệu có tác động lớn nhất đến độ bền kéo, trong khi mật độ lấp đầy có ảnh hưởng ít

nhất. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở dữ liệu hữu ích để thiết lập các tham số in 3D tối ưu cho những nghiên cứu và ứng dụng trong tương lai[8].

- Một số nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của năm thông số quy trình in FDM, gồm độ dày lớp, hướng in, cấu trúc điền đầy, mật độ điền đầy và nhiệt độ in đến độ bền kéo của sản phẩm PLA. Thiết kế thí nghiệm dựa trên phương pháp CCD được áp dụng để phân tích mối quan hệ giữa các thông số và phản hồi. Kết quả được kiểm chứng qua ANOVA và t-test, đồng thời sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để dự đoán độ bền kéo. Kết quả cho thấy mô hình ANN có độ chính xác cao ($R^2 = 0,964$) và lỗi tuyệt đối trung bình thấp hơn so với mô hình FCCCD, chứng minh ANN có khả năng dự đoán chính xác mối quan hệ giữa các thông số và độ bền.[9]

1.1.2. Nghiên cứu ngoài nước

Trên thế giới, các nghiên cứu về cơ tính của vật liệu in 3D từ PLA, PETG và ABS đã phát triển sâu rộng hơn. Các nghiên cứu quốc tế tập trung không chỉ vào cải thiện tính chất cơ học mà còn vào việc tối ưu hóa quy trình in 3D để tiết kiệm năng lượng trong sản xuất.

Các nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra rằng các thông số như độ dày lớp (layer thickness), mật độ điền đầy (infill percentage), góc raster (raster angle), tốc độ in (printing speed), và hướng in (build orientation) đóng vai trò quyết định đối với cơ tính của chi tiết in 3D[10-13]. Các nghiên cứu như của Ahn và cộng sự (2002)[14] đã tập trung vào việc tối ưu hóa tính chất cơ học của ABS thông qua việc phân tích ảnh hưởng của các thông số in FDM. Nghiên cứu này đã phát triển các quy tắc thiết kế để cải thiện cơ tính của các chi tiết FDM dựa trên các kết quả thực nghiệm khác đã đánh giá ảnh hưởng của độ dày lớp và mật độ điền đầy đến cơ tính của các chi tiết PLA và ABS. Ví dụ, nghiên cứu của Rajpurohit và cộng sự [15] cho thấy rằng độ dày lớp và góc raster là các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ bền kéo và mô đun đàn hồi của PLA. . Hơn nữa, một nghiên cứu khác kết luận rằng độ dày lớp và tỷ lệ lấp đầy là những thông số quan trọng nhất khi thiết kế các bộ phận làm bằng vật liệu ABS[16]. Những nghiên cứu khác đã được thực hiện nhằm xác định ảnh hưởng của

các tham số như góc raster, chiều rộng raster, hình dạng raster, mật độ điền đầy, kiểu điền đầy, tốc độ in, độ dày lớp, khe hở không khí, hướng in, và số lượng đường bao lên các đặc tính cơ học khác nhau [17-26]. Rayegani và Onwubolu đã sử dụng phương pháp tiến hóa khác biệt để xử lý các thông số nhằm tối ưu hóa độ bền kéo của bộ phận chi [27]. Các nhà nghiên cứu khác đã tập trung vào việc tối ưu hóa nhiều tính chất, tuy nhiên việc tối ưu hóa tính chất được thực hiện riêng biệt [10, 28, 29]. Nghiên cứu tiên tiến hơn tập trung vào việc tối ưu hóa hai hoặc nhiều đặc tính cùng lúc để đạt được một tập hợp tối ưu các thông số quy trình [30-32].

1.2. TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI

PLA đã được nghiên cứu rộng rãi. Nhiều nghiên cứu đã điều tra thực nghiệm về cách các đặc tính cơ học của bộ phận PLA bị ảnh hưởng bởi góc quét [4, 33-35]. Các nghiên cứu khác đã điều tra ảnh hưởng của độ dày lớp đến các tính chất cơ học của bộ phận PLA như độ bền kéo, độ bền uốn, mô đun đàn hồi, ứng suất cắt và độ bền va đập [28, 36-41]. Hơn nữa, tỷ lệ lấp đầy và tác động của tốc độ in lên các đặc tính cơ học của PLA đã được kiểm tra trong [39, 40, 42, 43]. Góc quét và ảnh hưởng của độ dày lớp lên các đặc tính cơ học của các bộ phận ABS cũng đã được nghiên cứu [44-46]. Hơn nữa, các đặc tính cơ học của bộ phận ABS bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ lấp đầy và tốc độ in [47-49]. Tuy nhiên, đối với vật liệu PETG, các nghiên cứu còn hạn chế, chủ yếu tập trung vào ảnh hưởng của góc raster và độ dày lớp [50, 51]. Điều này mở ra nhu cầu nghiên cứu sâu hơn về các thông số khác như tốc độ in và hướng in để tối ưu hóa cơ tính của vật liệu này.

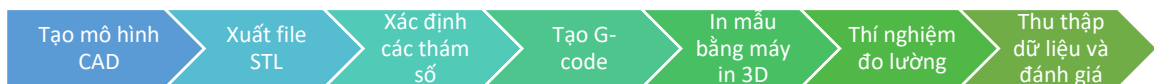
Các ngưng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng thông số công nghệ. Kết quả cho thấy mật độ điền đầy và độ dày lớp là hai yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất đến cơ tính của các chi tiết in 3D. Phân tích cũng chỉ ra rằng các thông số như góc raster và tốc độ in có tác động nhưng ít quan trọng hơn. Việc sử dụng ANOVA giúp định lượng và xếp hạng mức độ ảnh hưởng của từng thông số, từ đó đề xuất các giá trị tối ưu.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu tối ưu hóa từng thông số công nghệ riêng lẻ, các nghiên cứu về tối ưu hóa đồng thời nhiều thông số để đạt được bộ thông số tối ưu

chung vẫn còn hạn chế. Các khoảng trống nghiên cứu này đang được xem là hướng phát triển quan trọng để cải thiện độ tin cậy của quá trình FDM trong sản xuất.

Đề tài này nhằm mục đích khảo sát và đánh giá cơ tính của các mẫu in 3D từ ba loại vật liệu phổ biến: PLA, PETG và ABS. Mục tiêu chính là nghiên cứu ảnh hưởng đa yếu tố của các tham số in như nhiệt độ đầu in, nhiệt độ bàn in, tốc độ in, và độ dày lớp đến độ bền kéo của các sản phẩm in. Đây là các tham số quan trọng có ảnh hưởng đến sự kết dính giữa các lớp vật liệu và tính chất cơ học tổng thể của chi tiết in 3D. Tuy nhiên, việc tối ưu hóa các thông số in như nhiệt độ đầu in và nhiệt độ bàn in không chỉ giúp cải thiện độ bền của các mẫu in mà còn có ý nghĩa quan trọng trong việc tiết kiệm năng lượng và giảm thiểu thời gian in.

Quy trình nghiên cứu được thực hiện theo các bước chính được minh họa trong Hình 1.1. Trước tiên, mô hình chi tiết được thiết kế bằng phần mềm CAD và xuất ra định dạng STL để mô tả hình học bề mặt. Sau đó, mô hình được xuất ra file STL để đảm bảo tính tương thích với phần mềm in 3D. Tiếp theo, các thông số in quan trọng như chiều cao lớp in, tốc độ in, nhiệt độ đầu đùn và bàn in được xác định dựa trên yêu cầu thí nghiệm. Sau khi thiết lập các thông số, bước tạo mã lệnh G-code được thực hiện thông qua phần mềm slicing để điều khiển máy in 3D. Bước kế tiếp là in mẫu bằng máy in 3D, nhằm tạo ra các mẫu thử nghiệm thực tế. Các mẫu này được thí nghiệm đo lường cơ tính như kéo theo tiêu chuẩn (ASTM D638). Cuối cùng, dữ liệu thu thập được sẽ được phân tích và đánh giá nhằm xác định ảnh hưởng của các thông số in đến cơ tính của vật liệu, từ đó đưa ra kết luận và kiến nghị cho nghiên cứu.



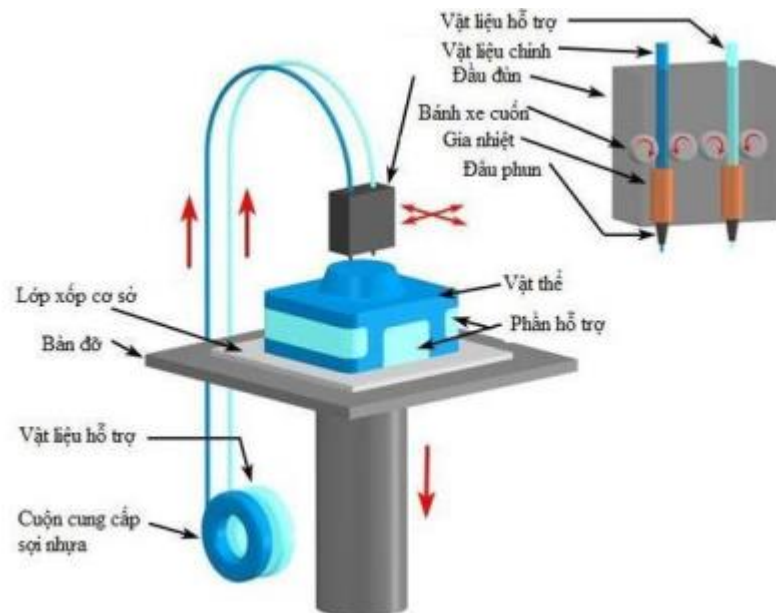
Hình 1.1. Quy trình nghiên cứu

1.3. CÁC THAM SỐ TRONG QUY TRÌNH IN

FDM là một công nghệ in 3D phổ biến để in sợi polymer và composite nhờ quy trình in linh hoạt và nhanh chóng, chi phí thấp, đa dạng và tính không độc hại

của vật liệu, đồng thời có độ cứng và độ bền cao. Hình ảnh minh họa về công nghệ in 3D FDM được hiển thị trong Hình 1.2 và quy trình in có thể được mô tả như sau:

- Mô hình 3D kỹ thuật số được xây dựng trong phần mềm CAD và lưu trữ dưới dạng tệp định dạng STL.
- Một mô-đun phần mềm cắt được sử dụng để chia mô hình 3D thành các lớp mảnh ngang và kiểm soát máy FDM.
- Các tham số in ấn bao gồm tốc độ in, độ dày lớp, nhiệt độ in, tỷ lệ điền, hướng in, cấu trúc hỗ trợ và nhiều thứ khác đều được thiết lập trong phần mềm cắt.
- Trong quá trình mô hình hóa, một sợi in ấn được trải ra vào ống phun ở trạng thái bán chất lỏng và được đặt lên lớp vật liệu trước đó.
- Sau khi lớp vật liệu mới đông rắn trên vật thể in 3D ở nhiệt độ phòng, nền in di chuyển xuống theo chiều cao của một lớp vật liệu và sau đó lớp vật liệu tiếp theo sẽ được in.
- Quá trình này tiếp tục cho đến khi toàn bộ mô hình đã được in. Cuối cùng, cấu trúc hỗ trợ sẽ được loại bỏ thủ công.

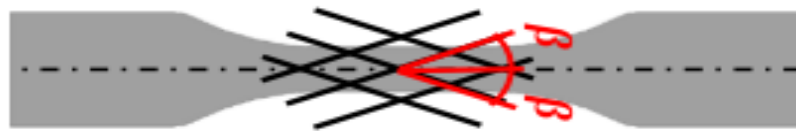


Hình 1.2. Sơ đồ công nghệ in 3D FDM

AM bao gồm nhiều công nghệ tạo ra các bộ phận vật lý bằng cách bổ sung liên tiếp các vật liệu. Nhiều ngành khác nhau như kiến trúc, y học, kỹ thuật, giáo dục và giải trí sử dụng công nghệ AM. Do sự phát triển nhanh chóng của công nghệ AM và

việc áp dụng chúng trong vô số ngành, có nhiều thuật ngữ khác nhau cho các ứng dụng hoặc lĩnh vực cụ thể khác nhau của AM. Để tránh nhầm lẫn có thể cản trở việc giao tiếp giữa các ngành khác nhau, phần này định nghĩa các thông số quy trình khác nhau dựa trên các tiêu chuẩn ASTM International [7, 52-54]. Đây là các thông số quy trình in FDM phổ biến nhất, cùng với các biến số và phạm vi của chúng:

- Góc raster, đôi khi được gọi là hướng raster, là hướng của các lớp được lắng đọng liên quan đến nền tảng xây dựng. Nó thường nằm trong khoảng từ 0° đến 90° . Các sợi lắng đọng thoát ra khỏi vòi phun máy in 3D tạo thành các raster (đùn) có thể được chế tạo bằng nhiều góc khác nhau để lấp đầy phần bên trong của bộ phận đang được sản xuất. Góc raster là một thông số thiết yếu cho quy trình FDM vì nó ảnh hưởng đến tính dị hướng của các bộ phận [14, 55]. Các kết quả được báo cáo trong tài liệu minh họa rằng góc raster ảnh hưởng đáng kể đến các tính chất cơ học của tất cả các vật liệu ở các mức độ khác nhau. Nhìn chung, độ bền kéo trở nên cao hơn khi hướng raster giống với hướng tải do tính dị hướng cao.



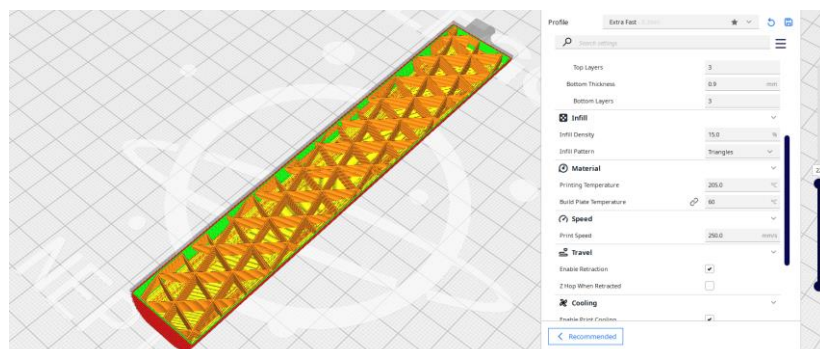
Hình 1.3. Góc raster trong mẫu in

- Độ dày lớp là chiều cao của mỗi lớp lắng đọng trong sản phẩm in 3D. Chiều cao của sản phẩm là tổng độ dày của các lớp xếp chồng được đùn ra từ đầu vòi phun. Nó phụ thuộc vào đường kính đầu vòi phun và vật liệu sợi. Thông thường, nó dao động từ 0,05 đến 0,8 mm. Hiệu ứng của độ dày lớp đối với độ bền và các đặc tính cơ học khác là đáng kể. Nhìn chung, kết quả thử nghiệm cho thấy độ bền uốn, độ bền kéo và độ bền nén tăng khi độ dày lớp giảm, điều này dẫn đến các sản phẩm được tạo thành từ nhiều lớp hơn. Do đó, việc tăng số lượng lớp dẫn đến tăng quá trình gia nhiệt lại các lớp trước đó, giúp cải thiện sự khuếch tán từ lớp này sang lớp khác. Ngoài ra, chất lượng bề mặt của các vật thể in tăng lên khi độ dày lớp giảm [56].



Hình 1.4. Kích thước lỗ đầu in phổ biến

- Tỷ lệ lấp đầy, đôi khi được gọi là mật độ lấp đầy, mô tả độ rắn chắc của cấu trúc bên trong vô hình của một bộ phận được in. Nói cách khác, nó mô tả thể tích lấp đầy, đóng vai trò chính trong độ bền và khối lượng của bộ phận được in. Thông thường, nó nằm trong khoảng từ 20% đến 100%. Tỷ lệ lấp đầy được coi là một trong những thông số hàng đầu ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính cơ học của bộ phận [57]. Ví dụ, tỷ lệ lấp đầy xác định vùng tiếp xúc giữa các lớp và các lớp sợi, ảnh hưởng đến các đặc tính cơ học [10, 58]. Các nghiên cứu cho thấy tỷ lệ lấp đầy có ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính cơ học. Kết quả của họ chỉ ra rằng các đặc tính cơ học được cải thiện khi tỷ lệ lấp đầy tăng lên vì phần chịu lực (ngang với tải) nhỏ hơn với tỷ lệ lấp đầy thấp hơn.



Hình 1.5. Kiểu cấu trúc và tỷ lệ điền đầy trên phần mềm CURA

- Tốc độ in là tốc độ ngang của vòi phun trên nền tảng in trong quá trình đùn và lắng đọng. Nó quyết định tổng thời gian in. Nó phụ thuộc vào kỹ thuật in (in

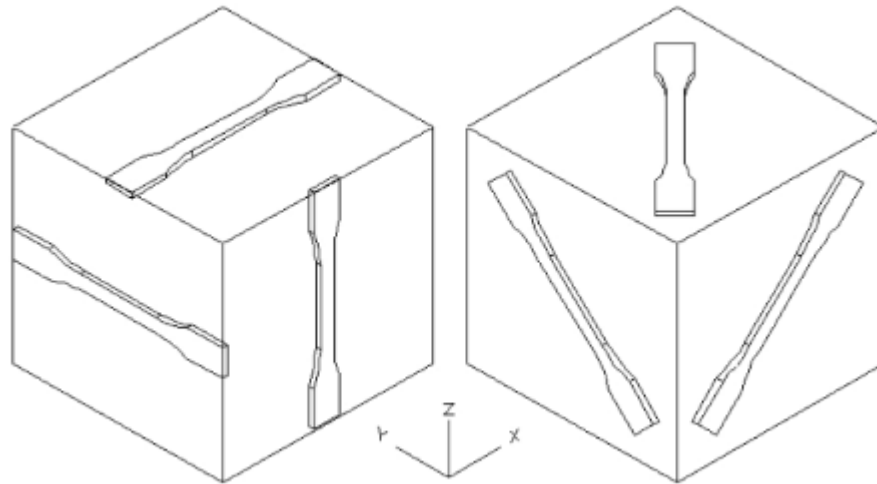
thạch bản lập thể (SLA), thiêu kết laser chọn lọc (SLS) và FDM) và vật liệu sợi được sử dụng. Thông thường, nó dao động từ 15 đến 90 mm/giây. Tốc độ in ảnh hưởng đến độ lan truyền của vật liệu và kích thước tạo hình nhiều hơn tất cả các thông số quy trình FDM khác. Tốc độ in cao dẫn đến đùn quá mức ở các cạnh của bộ phận và làm giảm chiều rộng đùn dẫn đến độ chính xác về kích thước kém vì các lớp bổ sung được thêm vào trước khi các lớp trước đó đông cứng hoàn toàn.

- Nhiệt độ đùn được định nghĩa là nhiệt độ gia nhiệt cho vật liệu sợi trong phần vòi phun trong quá trình đùn. Nó thay đổi tùy thuộc vào loại vật liệu nhiệt dẻo và tốc độ in. Phạm vi nhiệt độ đùn được minh họa trong **Bảng 1.2**.

Bảng 1.2. Đặc tính cơ học và đặc điểm in của các vật liệu FDM khác nhau

Tính chất	PLA	ABS	PETG
Nhiệt độ đùn (°C)	190–210	220–260	230–250
Nhiệt độ bàn in (°C)	25–80	90–110	60–80
Mật độ (g/cm ³)	1.25	1.04	1.23
Độ bền kéo (MPa)	65	43	49
Độ bền uốn (MPa)	97	66	70
Độ bền va đập Izod (kJ/m ²)	4	19	7.6
Khả năng tái chế	Có	Có	Không
Khả năng phân hủy sinh học	Có	Không	Không
Độc tính khói	Rất thấp	Trung bình	Rất thấp

- Định hướng xây dựng được định nghĩa là tư thế/hướng của một đối tượng liên quan đến các hướng hệ tọa độ Descartes trong khi in. Thông thường, tư thế thẳng đứng là mặt phẳng ZY, tư thế cạnh là mặt phẳng YZ và tư thế phẳng là mặt phẳng YX như được trình bày trong **Hình 1.6**.



Hình 1.6. Định hướng của mẫu vật

- Khe hở không khí là khe hở giữa các raster trên cùng một lớp của một bộ phận in. Nó thường nằm trong khoảng từ 0 đến 0,08 mm. Tuy nhiên, khe hở không khí cũng có thể là âm (chồng chất lắng đọng liền kề) trong quá trình lấp đầy 100%. Tác động của khe hở không khí lên các đặc tính cơ học của các bộ phận PLA có thể thấp [59], trong khi nó có thể liên quan đến các bộ phận ABS [60]. Khe hở không khí âm làm tăng cả độ bền và độ cứng.
- Chiều rộng raster là chiều rộng của một raster lắng đọng đơn lẻ và phụ thuộc vào đường kính vòi phun đùn, tốc độ in và tỷ lệ giữa tốc độ in và tốc độ đùn, được gọi là “hệ số nhân đùn” [61]. Việc hiệu chuẩn thông số này rất quan trọng đối với độ chính xác của bộ phận và các đặc tính cơ học. Thông thường, nó nằm trong khoảng từ 0,1 đến 1 mm.
- Đường viền là lớp rắn bên ngoài bao quanh cấu trúc lấp đầy bên trong của phần in. Nó tương ứng với số lớp rắn bên ngoài. Thông thường, nó nằm trong khoảng từ 1 đến 6 đường viền.

1.4. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này được thực hiện dựa trên phương pháp kết hợp giữa lý thuyết và thực nghiệm, nhằm đánh giá và tối ưu hóa các thông số in 3D ảnh hưởng đến cơ tính của các vật liệu PLA, PETG và ABS. Đồng thời, nghiên cứu này còn chú trọng đến việc tiết kiệm năng lượng thông qua điều chỉnh các tham số in một cách hợp lý.

1.4.1. Nghiên cứu lý thuyết

Bước đầu tiên là tổng quan tài liệu liên quan đến quy trình in 3D FDM và ảnh hưởng của các thông số in như nhiệt độ đầu in, nhiệt độ bàn in, tốc độ in, và độ dày lớp,... đến cơ tính của các vật liệu PLA, PETG và ABS. Các nghiên cứu trước đó về ứng suất kéo, độ bền và khả năng chịu lực của các vật liệu này sẽ được tham khảo kỹ lưỡng. Đồng thời, các tiêu chuẩn ASTM D638 về kiểm tra kéo cũng sẽ được áp dụng để đảm bảo tính chính xác của kết quả.

1.4.2. Thiết kế thí nghiệm

Nghiên cứu sử dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm Box-Behnken để tối ưu hóa các thông số in như nhiệt độ đầu in, nhiệt độ bàn in, tốc độ in, và độ dày lớp. Phương pháp thiết kế thí nghiệm Box-Behnken (Box-Behnken Design - BBD) là một kỹ thuật trong phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology - RSM), được sử dụng để tối ưu hóa các hệ thống và quy trình có nhiều biến đầu vào. Được phát triển bởi George E.P. Box và Donald Behnken, BBD được thiết kế để giảm số lượng thí nghiệm cần thiết, trong khi vẫn đảm bảo khả năng mô hình hóa mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số đầu vào và đầu ra. Phương pháp này chọn các điểm thí nghiệm nằm ở trung tâm các cạnh và ở tâm của không gian thiết kế, giúp tiết kiệm chi phí và giảm rủi ro liên quan đến việc thực hiện thí nghiệm tại các giá trị cực trị. Mỗi thông số đầu vào được chọn ở ba mức (-1, 0, 1), với số lượng thí nghiệm tối thiểu được tính toán dựa trên số lượng biến độc lập. Để đảm bảo tính khách quan và độ chính xác, các thí nghiệm cần được sắp xếp ngẫu nhiên và lặp lại ở tâm không gian. Dữ liệu thu thập sẽ được phân tích bằng các công cụ thống kê như ANOVA để xây dựng mô hình bậc hai, xác định mối quan hệ giữa các yếu tố và tối ưu hóa đầu ra. Ưu điểm của phương pháp này bao gồm giảm thời gian, chi phí thực hiện thí nghiệm, và dễ dàng mô hình hóa các mối quan hệ phi tuyến. Box-Behnken được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như in 3D, công nghiệp hóa học, kỹ thuật y sinh, và công nghiệp thực phẩm, nơi mà nó đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện chất lượng sản phẩm và hiệu suất hệ thống.

Mỗi vật liệu sẽ được in với các mẫu thử khác nhau theo ma trận Box-Behnken, nhằm xác định sự kết hợp tốt nhất của các thông số để tối ưu hóa độ bền kéo và cơ tính tổng thể.

1.4.3. Thực nghiệm và kiểm tra cơ tính

Sau khi in xong các mẫu thử, chúng sẽ được kiểm tra cơ tính, đặc biệt là kiểm tra kéo theo tiêu chuẩn ASTM D638. Máy kéo vạn năng sẽ được sử dụng để kiểm tra ứng suất kéo, ứng suất tại điểm đứt, và độ giãn dài của các mẫu. Các thông số như tốc độ kéo và tải trọng tối đa sẽ được điều chỉnh để phù hợp với tiêu chuẩn thử nghiệm

- Máy thử kéo được thiết lập với tải trọng tối đa **50 kN** và tốc độ kéo **1 mm/phút**, đảm bảo quá trình đo lường chính xác và đáng tin cậy.
- Mẫu thử được kiểm tra để thu thập dữ liệu về cơ tính và đánh giá mức độ ảnh hưởng của các tham số in đến độ bền kéo của từng loại vật liệu.

1.4.4. Phân tích dữ liệu và tối ưu hóa

Sau khi thực hiện thí nghiệm, các dữ liệu thu thập sẽ được phân tích bằng phần mềm thống kê, sử dụng các phương pháp như phân tích phương sai (ANOVA) để đánh giá tác động của từng tham số in đến cơ tính của mẫu in. Việc phân tích dữ liệu này sẽ giúp tìm ra sự kết hợp các tham số tối ưu để đạt được độ bền kéo cao nhất cho từng loại vật liệu, đồng thời giảm thiểu tiêu thụ năng lượng.

Phương pháp phân tích đa mục tiêu sẽ được sử dụng để tối ưu hóa đồng thời các chỉ tiêu về cơ tính và năng lượng tiêu thụ, nhằm xác định điều kiện in 3D tốt nhất cho từng loại vật liệu, đảm bảo tính bền vững và hiệu quả trong sản xuất.

1.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

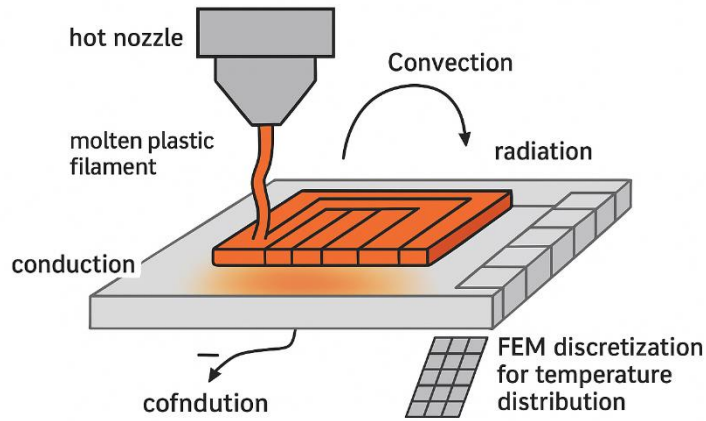
Chương 1 đã tổng quan về sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ in 3D, đặc biệt với các vật liệu như PLA, PETG, và ABS. Các nghiên cứu đã khẳng định rằng việc tối ưu hóa các tham số in như nhiệt độ đầu in, nhiệt độ bàn in, tốc độ in, và độ dày lớp đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện cơ tính, đặc biệt là độ bền kéo của sản phẩm.

Bên cạnh đó, xu hướng tiết kiệm năng lượng trong quá trình in cũng được nhấn mạnh, giúp giảm đến 20% năng lượng tiêu thụ mà vẫn đảm bảo chất lượng sản phẩm. Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh ngành công nghiệp ngày càng quan tâm đến phát triển bền vững và hiệu quả sản xuất.

CHƯƠNG 2 - CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. CƠ SỞ TOÁN HỌC

2.1.1. Mô tả mô hình nhiệt



Hình 2.1. Mô tả mô hình nhiệt

Các điều kiện sau phải được đáp ứng để tạo ra một mô hình mô phỏng cho quá trình FDM: Giải quyết vấn đề truyền nhiệt thoáng qua, mô phỏng việc chèn vật liệu, xem xét tổn thất nhiệt trong quá trình lắng đọng và tính đến các đặc tính vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ. Nguyên lý bảo đảm năng lượng, khẳng định rằng sự khác biệt giữa sản sinh nhiệt trong thể tích và dòng nhiệt trên bề mặt ranh giới bằng với sự biến động năng lượng trong một thể tích trong một thời gian, cung cấp nền tảng cho việc xây dựng vấn đề nhiệt[62].

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} + q_{gen} \quad (2.1)$$

Trong đó: $\vec{q}$ là vector mật độ dòng nhiệt, q_{gen} là mật độ nguồn sinh nhiệt và U là suất nội năng riêng. Hơn nữa, phương trình cấu thành cho thấy định luật Fourier liên kết nhiệt độ và thông lượng nhiệt

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (2.2)$$

Trong đó k là độ dẫn nhiệt và T là nhiệt độ. Phương thức cấu thành xác định mối liên hệ giữa năng lượng bên trong cụ thể U và nhiệt độ T

$$U = U_0 + pcT \quad (2.3)$$

Trong đó c là nhiệt dung riêng của vật liệu và p là mật độ khối lượng của nó. Phương trình vi phân từng phần cho quá trình nhiệt như sau:

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla \cdot (k \nabla T) + q_{\text{gen}} \quad (2.4)$$

Ở đây, giả sử không có nguồn nhiệt ngụ ý rằng không có thêm nhiệt bên trong được tạo ra bên trong vật liệu, do đó, $q_{\text{gen}} = 0$. Do đó, sự truyền nhiệt phụ thuộc hoàn toàn vào sự phân bố nhiệt độ ban đầu và thông lượng nhiệt qua ranh giới của vật liệu. Đối với máy đun nóng tạo ra nhiệt độ cao và nhiệt độ vật liệu tác động, hệ số sinh nhiệt bên trong không được bao gồm trong mô hình nhiệt. Sự đơn giản hóa này có nghĩa là khi tính toán phân bố nhiệt độ, chỉ tính đến sự dẫn nhiệt do gradient nhiệt độ và các điều kiện ranh giới như nhiệt độ môi trường hoặc thông lượng nhiệt ở bề mặt.

Đây là dạng mạnh của mô hình toán học, phải được giải quyết để xác định lịch sử thời gian của nhiệt độ. Vì một giải pháp phân tích hoặc khép kín là không khả thi, nghiên cứu này sẽ sử dụng giải pháp số hoặc mô phỏng FE. Sử dụng cách tiếp cận Galerkin thông thường với các phần tử hữu hạn, mô hình nhiệt đầu tiên được rời rạc trong không gian. Nhiệt độ thay đổi theo thời gian và không gian là tốt. Sự phụ thuộc này được chia cho từng phần tử bằng cách sử dụng mô hình nội suy.

$$T(x, y, z, t) = T(x_1, y_2, z_3, t) = N(x_1, y_2, z_3)^T T_e(t) \quad (2.5)$$

Trong đó, $N(x_1, y_2, z_3)^T$ là ma trận chuyển vị của hàm hình dạng phần tử và $T_e(t)$ là vector của nhiệt độ nút.

Hệ phương trình vi phân được biểu thị bởi:

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (2.6)$$

Trong đó, C là ma trận nhiệt dung riêng, T là vector nút của nhiệt độ, J là tốc độ thay đổi của nhiệt độ, K là độ dẫn điện và Q là vector dòng nhiệt. Mỗi bước thời gian trong quá trình rời rạc hóa sẽ tạo ra một hệ phương trình đại số có thể được giải để tìm ra các nhiệt độ nút chưa biết. Biểu diễn số của trường nhiệt độ được đưa ra bởi lời giải phương trình FE. Độ bám dính giữa các sợi có thể được dự đoán bằng cách kết hợp mô hình điện thế liên kết với lịch sử thời gian của nhiệt độ tại một nơi trong không gian. Ngoài ra, sử dụng định nghĩa, vấn đề thay đổi pha có thể được giải quyết bằng cách xác định ma trận nhiệt cụ thể từ đường cong entanpy:

$$H = \int_T^{T_0} p(T) c(T) dT \quad (2.7)$$

Dây nhựa được ép đùn ở nhiệt độ T_0 trong quá trình FDM và lắng đọng trên bàn in xây dựng D_b , được nung nóng đến T_b . Nhiệt độ T_c được duy trì không đổi trong buồng xây dựng D_c . Các sợi trao đổi nhiệt năng lượng với không khí trong buồng cũng như vật liệu đã được lắng đọng trước đó do gradient nhiệt độ theo phương trình (2.4).

$$p c \dot{T} = -\nabla \cdot (k \nabla T) + q_{gen} \quad (2.8)$$

Phương trình nhiệt nổi tiếng này, trong đó $p = p(T)$ là mật độ vật liệu, $c = c(T)$ là nhiệt dung riêng, $k = k(T)$ hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc nhiệt độ, $q_{gen} \geq 0$ là nguồn nhiệt bên trong và t là thời gian, kiểm soát sự phát triển thời gian-không gian của trường nhiệt độ $T(x, t)$. Các trường hợp bắt đầu của vấn đề được cung cấp bởi

$$T(x, 0) = T_n \quad x \in D_f \quad (2.9)$$

$$T(x, 0) = T_c \quad x \in D_c \quad (2.10)$$

Trong đó x đại diện cho vector vị trí (x, y, z) , D_f biểu thị vật liệu lắng đọng ép đùn, T_n và T_c , đề cập đến nhiệt độ đùn và nhiệt độ buồng của buồng xây dựng. Bản chất của điều kiện ranh giới Dirichlet là chỉ ra hàm nghiệm có giá trị bao nhiêu tại các vị trí nhất định dọc theo ranh giới của một vùng. Thông thường, những điều này được cố định bằng những cân nhắc về thể chất hoặc thí nghiệm. Do đó, điều kiện biên Neumann xác định:

$$T(x, t) = T_b \quad x \in D_b \quad (2.11)$$

Một phương pháp là áp đặt các điều kiện biên như vậy lên một hàm nghiệm bằng cách xác định cách nó thay đổi ở rìa của vùng nơi chúng áp dụng:

$$k \frac{\partial U}{\partial t} + q_c + q_r = 0 \quad x \in S(t) \quad (2.12)$$

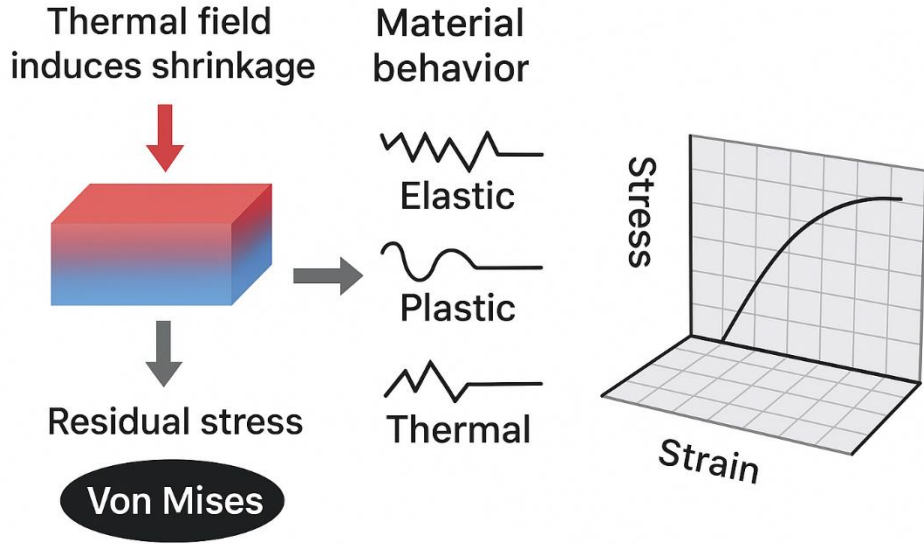
Trong đó $S(t)$ đại diện cho bề mặt bên ngoài của vật n là vector vuông góc với q và q đề cập đến các thông lượng nhiệt do đối lưu và trên lớp ngoài của bức xạ cơ thể, được định nghĩa là

$$q_c = h(T - T_c) \quad (2.13)$$

$$q_r = K_b(T^4 - T_c^4)\epsilon \quad (2.14)$$

Trong đó $h=h(T)$ là hệ số truyền nhiệt, K_b đại diện cho hằng số Stefan-Boltzmann và ϵ là độ phát xạ.

2.1.2. Mô tả mô hình vật lý.



Hình 2.2. Mô tả mô hình vật lý.

Mô phỏng quá trình biến dạng thường được tính đến trong lý thuyết dẻo tăng dần, với giả định rằng biến dạng là nhỏ[62].

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^T \quad (2.15)$$

Trong đó, ϵ là tổng biến dạng, ϵ^e biến dạng đàn hồi, ϵ^p là biến dạng dẻo và ϵ^T là tensor biến dạng nhiệt. Chúng có thể được biểu thị bằng cách sử dụng ký hiệu Voigt:

$$\epsilon^e = D^{-1} \quad (2.16)$$

$$d\epsilon^p = d\lambda \frac{3 \sigma^{dev}}{2 \sigma_{vm}} \quad (2.17)$$

$$f(\sigma) = \sqrt{3}J_2 - \sigma_Y \quad (2.18)$$

$$\epsilon^T = \alpha(T - T_o)1 \quad (2.19)$$

Trong đó σ là ứng suất, trong đó J_2 là bất biến thứ hai của tensor ứng suất lệch và σ_Y là ứng suất chảy, α là giãn nở nhiệt, $1 = \{1, 1, 1, 0, 0, 0\}^T$ và cuối cùng σ^{dev} là ứng suất lệch

$$\sigma^{dev} = \sigma - \frac{1}{3} \text{tr} \sigma 1 \quad (2.20)$$

Hệ số dòng chảy nhựa hoặc $d\lambda$, được mô tả như sau:

$$d\lambda = 0 \text{ nếu } \sigma_{vm} < \sigma_p \quad (2.21)$$

$$d\lambda > 0 \text{ nếu } \sigma_{vm} > \sigma_p \quad (2.22)$$

Trong đó σ_p là ứng suất chảy và σ_{vm} là ứng suất von Mises tương đương được định nghĩa là:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma^{dev})^T \sigma^{dev}} \quad (2.23)$$

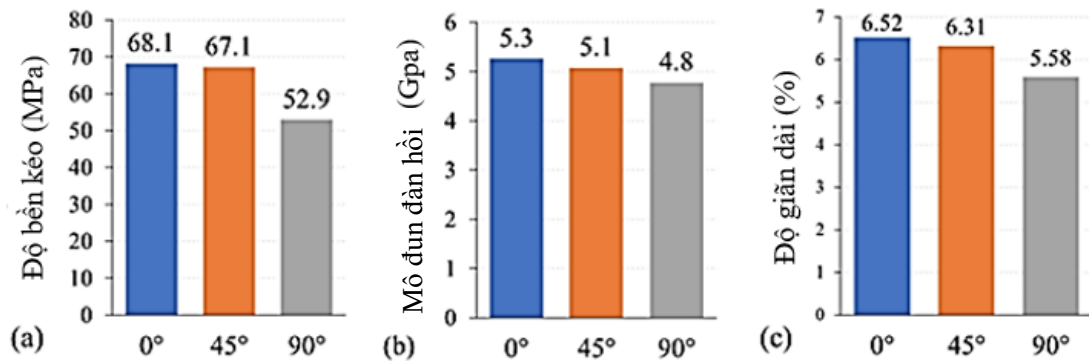
2.2. TÌM HIỂU VỀ VẬT LIỆU IN 3D VÀ MỨC ĐỘ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ IN.

2.2.1. PLA (Polylactic Acid):

PLA là sợi nhiệt dẻo phân hủy sinh học được sử dụng ngày càng nhiều trong FDM. Nó đòi hỏi năng lượng và nhiệt độ thấp được đun và một lớp nền được gia nhiệt vừa phải trong quá trình lắng đọng để tạo ra một vật thể. Do đó, PLA tạo ra các bộ phận có độ bền kéo cao hơn và độ dẻo thấp hơn các vật liệu thông thường khác. Nó được sử dụng trong bao bì thực phẩm, cấy ghép tim mạch và khung răng [20, 63].

2.2.1.1. Ảnh hưởng của góc Raster

Dựa trên các nghiên cứu đã tham khảo, nhiều thí nghiệm trên vật liệu PLA cho thấy độ bền kéo cực đại (UTS) phụ thuộc mạnh mẽ vào góc quét [37, 64, 65]. Zhang và cộng sự [66] đã phân tích ảnh hưởng của góc raster đến các tính chất cơ học của các bộ phận PLA được sản xuất bằng phương pháp FDM, và họ nhận thấy rằng góc raster ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính cơ học, minh họa trong Hình 2.3a–c. Algarni [33] cũng đã nghiên cứu tác động của góc raster lên các mẫu PLA, kết luận rằng UTS giảm đáng kể khi góc raster thay đổi từ 0° đến 90° , với mức giảm lên tới 36%. Tương tự, mô đun Young và độ giãn dài khi đứt cũng giảm lần lượt 9% và 14%.

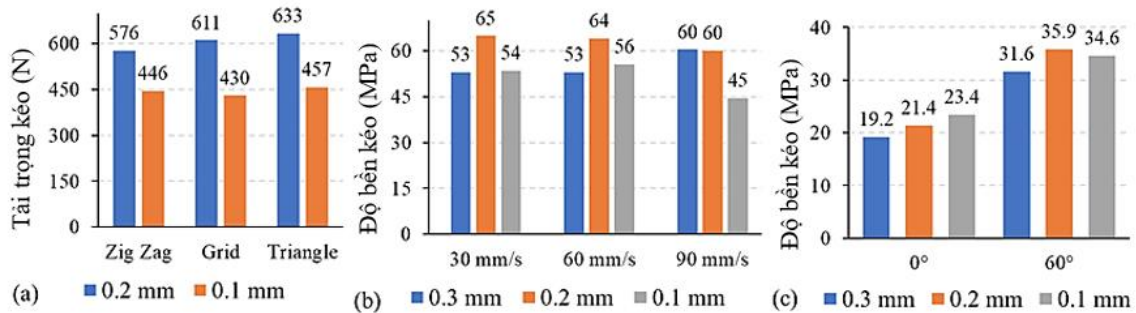


Hình 2.3. Ảnh hưởng của góc raster trên PLA (a) độ bền kéo, (b) Mô đun đàn hồi và (c) % độ giãn dài.

2.2.1.2. Ảnh hưởng của độ dày lớp

Một nghiên cứu trong [67] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các độ dày lớp khác nhau lên các mẫu hình xương chó FDM có chiều dài đo 25 mm. Các độ dày lớp khác nhau là 0,1 và 0,2 mm, và ba mẫu của mỗi độ dày lớp đã được thử nghiệm. Ba mẫu chèn riêng biệt đã được sử dụng và kết quả thử nghiệm cho thấy độ dày lớp ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu tải của cả ba mẫu, như thể hiện trong Hình 2.4a. Một nghiên cứu khác trong [68] đã thiết kế các mẫu theo tiêu chuẩn ASTM D368 và thử nghiệm độ dày lớp trong khoảng từ (0,1-0,3 mm) ở ba tốc độ đùn khác nhau. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong Hình 2.4b. Ngoài ra, một nghiên cứu trong [69] đã trình bày một mô hình cơ học mới về các tính chất cơ học khác nhau có thể dự đoán chính xác độ bền và mô đun Young của FDM PLA. Dữ liệu thực nghiệm cho thấy

hiệu ứng tương tự của độ dày lớp đối với độ bền trong khi thay đổi góc raster trong Hình 2.4c.



Hình 2.4. (a) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp (mm) với các mẫu lớp dày khác nhau, (b) Độ nhạy của độ bền PLA với độ dày lớp với các tốc độ đùn khác nhau (mm/giây) và (c) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp với các góc raster khác nhau (tính theo độ).

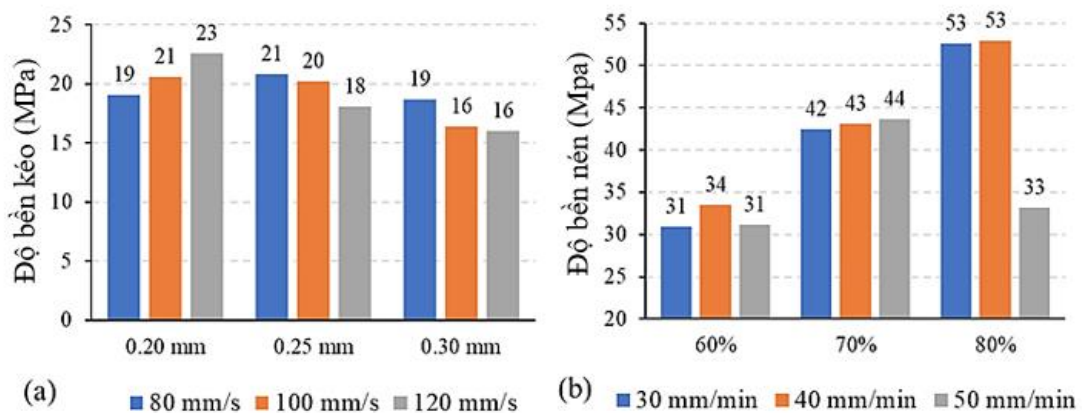
2.2.1.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ lớp dày

Panes et al. đã nghiên cứu tác động của các thông số sản xuất khác nhau lên hành vi cơ học của các bộ phận PLA được chế tạo thông qua phương pháp FDM [70]. Nghiên cứu kết luận rằng việc tăng tỷ lệ lớp dày từ 20% lên 50% đã cải thiện UTS 27%, ứng suất chảy 21%, mô đun Young 34% và độ giãn dài khi đứt 30%. Họ cũng kết luận rằng tỷ lệ lớp dày ảnh hưởng đến những đặc điểm này nhiều hơn chiều cao lớp và hướng xây dựng. Một nghiên cứu của Rismalia et al. [71] cho thấy việc tăng tỷ lệ lớp dày PLA từ 25% đến 75% có thể tăng cường UTS, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi lần lượt là 40%, 34% và 15%.

2.2.1.4. Ảnh hưởng của tốc độ in

Tốc độ in khác nhau có ảnh hưởng đáng kể đến sự lan rộng và kích thước tạo hình của vật liệu. Ở các bộ phận nhỏ, tốc độ in cao dẫn đến biến dạng vật liệu do các lớp mới được đặt lên trên các lớp chưa đông cứng hoàn toàn. Do đó, trọng lượng của lớp mới làm biến dạng lớp trước đó. Tốc độ in ảnh hưởng đến chiều rộng lắng đọng nhiều hơn là chiều cao lắng đọng [72]. Hơn nữa, các nhà nghiên cứu đã kết luận rằng tốc độ in cao hơn làm giảm nhẹ độ bền kéo [73]. Một nghiên cứu trong [74] đã kiểm tra những thay đổi về độ bền kéo. Như được trình bày trong Hình 2.5a, các kết quả liên quan đến tác động của tốc độ in lên độ bền kéo phù hợp với các nghiên cứu trước

đây. Một nghiên cứu trong [43] đã nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ in lên mô đun Young của PLA. Nghiên cứu cho thấy các tốc độ in khác nhau (70, 80, 90, 100 và 110 mm/giây) không làm thay đổi mô đun Young quá 20%. Ngoài ra, tốc độ in cao hơn ảnh hưởng đến cách sợi nóng chảy và gây ra độ bám dính lớp này sang lớp khác kém, dẫn đến độ bền thấp hơn. Một nghiên cứu khác trong [75] đã kiểm tra ảnh hưởng của các tốc độ in khác nhau (30, 40 và 50 mm/phút) đến cường độ nén của PLA. Những thay đổi kết quả là không đáng kể, như thể hiện trong Hình 2.5b.



Hình 2.5. (a) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp (mm) với các mẫu lắp đầy khác nhau, (b) Độ nhạy của độ bền PLA với độ dày lớp với các tốc độ đun khác nhau (mm/giây) và (c) Độ nhạy của cường độ PLA với độ dày lớp với các góc raster khác nhau (tính theo độ).

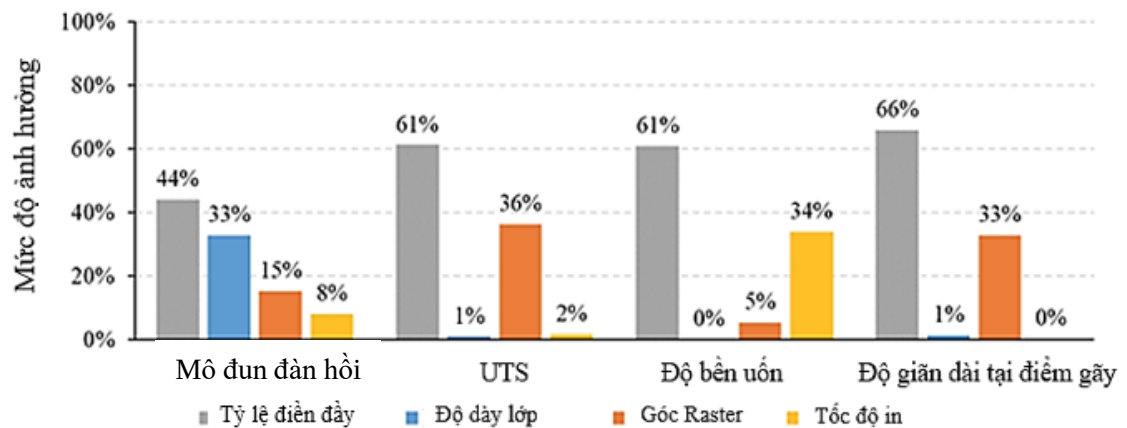
2.2.1.5. Nghiên cứu độ nhạy của tính chất cơ học

PLA bằng ANOVA Dữ liệu trên chứng minh rằng các đặc tính cơ học của các bộ phận chế tạo bằng PLA bị ảnh hưởng bởi các biến quy trình được chọn ở các mức độ khác nhau. ANOVA đánh giá phương sai giữa các nhóm và được sử dụng để xác định tác động của các thông số quy trình khác nhau (góc quét, tỷ lệ lắp đầy, tốc độ in và độ dày lớp) lên các đặc tính vật liệu khác nhau (mô đun Young, UTS, độ bền uốn và độ giãn dài khi đứt). ANOVA cho phép phân định trọng số phương sai của các nhóm khác nhau, giúp hiểu được tác động của từng thông số quy trình lên các đặc tính cơ học khác nhau. Phạm vi cho từng thông số quy trình được tóm tắt trong Bảng 2.1. cho thấy tỷ lệ lắp đầy và độ dày lớp ảnh hưởng đáng kể đến mô đun Young. UTS chủ yếu bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ lắp đầy và góc raster. Độ bền uốn bị ảnh hưởng rất nhiều bởi tỷ lệ lắp đầy và tốc độ in. Độ giãn dài khi đứt được xác định bởi tỷ lệ lắp

đầy và góc raster. Các thông số quy trình được xếp hạng trong Bảng 2.2 theo ảnh hưởng tương ứng của chúng đến các tính chất vật liệu PLA đã chỉ định.

Bảng 2.1. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho PLA cùng với các thiết lập liên quan.

Thang số	Phạm vi lựa chọn	Thấp	Trung bình	Cao
Góc raster	0°–90°	0°	45°	90°
Độ dày lớp	0.1–0.3 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm
Tỷ lệ điền đầy	20%–100%	20%	50%	100%
Tốc độ in	35–65 mm/s	35 mm/s	50 mm/s	65 mm/s



Hình 2.6. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho PLA cùng với các thiết lập liên quan.

Bảng 2.2. Bảng xếp hạng các thông số theo mức độ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của PLA được xác định bằng ANOVA.

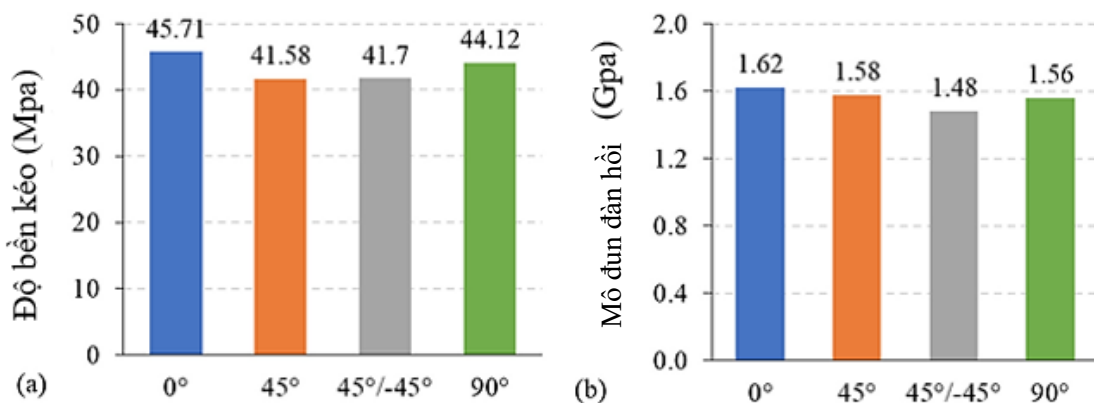
Tính chất vật liệu	Thứ nhất	Thứ hai	Thứ ba	Thứ tư
Mô đun đàn hồi (Young's Modulus)	Tỷ lệ điền đầy	Độ dày lớp	Góc raster	Tốc độ in
Giới hạn bền kéo (UTS)	Tỷ lệ điền đầy	Góc raster	Tốc độ in	Độ dày lớp
Độ bền uốn (Flexural Strength)	Tỷ lệ điền đầy	Tốc độ in	Góc raster	Tốc độ in
Độ giãn dài tại điểm gãy (Elongation at break)	Tỷ lệ điền đầy	Góc raster	Độ dày lớp	Tốc độ in

2.2.2. PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol):

PETG là một loại polyme dẫn xuất của họ polyethylene terephthalate. Nó quen thuộc trong các quy trình sản xuất truyền thống (ví dụ, ép phun) và gần đây đã được giới thiệu trong AM. Các đặc tính và khả năng đầy hứa hẹn của nó đang được nghiên cứu. Nó có các đặc tính tuyệt vời như khả năng định hình, biến đổi nhiệt và nhiệt độ định hình thấp. Nó được sử dụng trong cấy ghép y tế và nhiều ứng dụng thương mại như vật liệu đóng gói [76].

2.2.2.1. Ảnh hưởng của góc Raster

Vật liệu PETG vượt trội hơn ABS và PLA trong một số ứng dụng do có độ bền và độ ổn định trong nhiều điều kiện tải liên quan đến môi trường và gãy xương [77]. Dolzyk và cộng sự [78] đã nghiên cứu các tính chất cơ học của các bộ phận PETG được in 3D bằng cách tiến hành thử nghiệm phiếu giảm giá với bốn góc raster: dọc (0°), ngang (90°), đường chéo (45°), và chéo nhau ($45^\circ/-45^\circ$). Hình 2.7a, b cho thấy tác động của góc raster lên các đặc tính cơ học của PETG. UTS cao nhất và thấp nhất của hai mẫu vật là 45,7 MPa và 41,6 MPa, tương ứng với hướng raster dọc và chéo. Hơn nữa, mô đun Young cao nhất và thấp nhất của hai mẫu vật là 1,62 GPa và 1,48 GPa, tương ứng với hướng raster dọc và chéo.

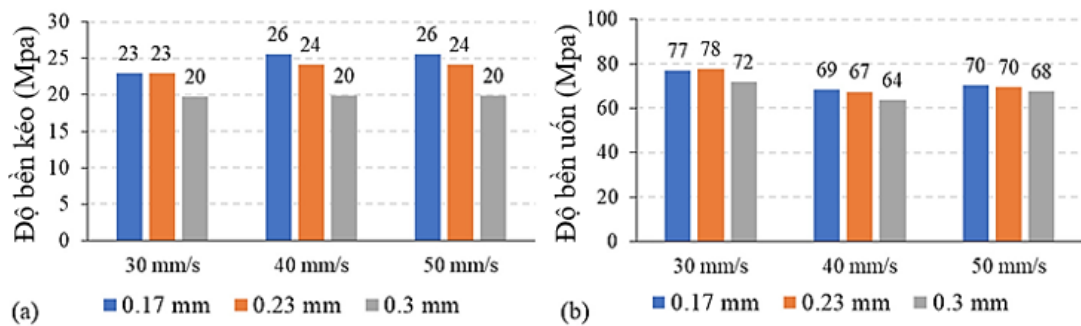


Hình 2.7. PETG (a) sức mạnh và (b) Độ nhảy mô đun đàn hồi với nhiều góc raster khác nhau (tính theo độ).

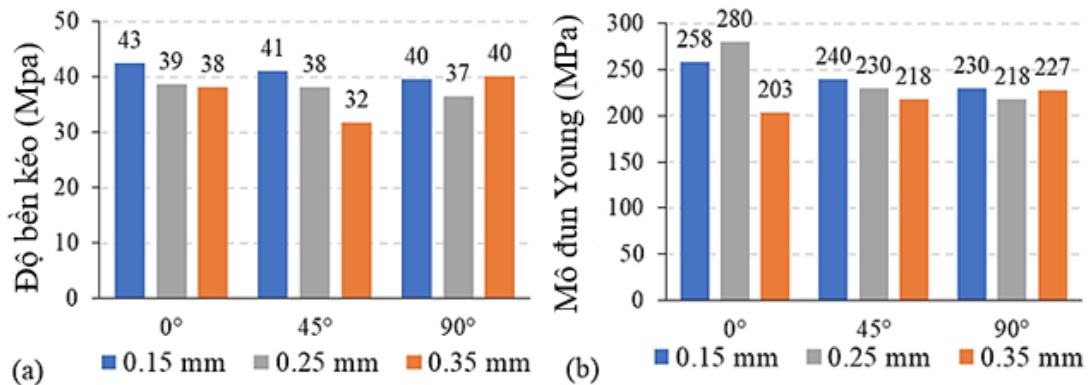
2.2.2.2. Ảnh hưởng của độ dày lớp

Tính chất cơ học của PETG thay đổi đáng kể khi độ dày lớp thay đổi. Một nghiên cứu trong [79] cho thấy độ dày lớp ảnh hưởng đến độ bền kéo và uốn. Nghiên

cứ đã điều tra ảnh hưởng của các độ dày lớp khác nhau (0,17, 0,23 và 0,3 mm) với các tốc độ nạp khác nhau. Kết quả được trình bày trong Hình 2.8a,b. Một nghiên cứu trong [80] đã nghiên cứu ảnh hưởng của độ dày lớp lên độ bền kéo của PETG. Kết quả cho thấy UTS giảm 30% khi độ dày lớp thay đổi từ 0,1 đến 0,2 mm. Một nghiên cứu gần đây trong [50] đã nêu rằng độ bền kéo và mô đun Young bị ảnh hưởng rất nhiều bởi độ dày lớp. Độ bền kéo cao nhất đạt được ở độ dày lớp nhỏ nhất (Hình 2.9 a, b).



Hình 2.8. PETG (a) kéo và (b) độ nhạy về độ bền uốn đối với các độ dày lớp khác nhau với tốc độ in khác nhau (tính bằng mm/giây).

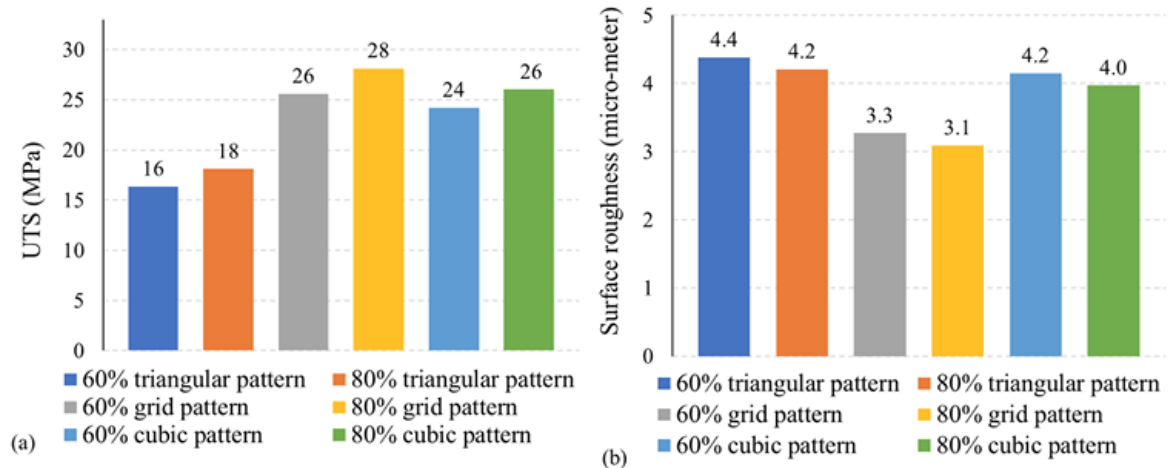


Hình 2.9. PETG (a) độ bền kéo và (b) Độ nhạy mô đun Young đối với độ dày lớp với các góc raster khác nhau (tính bằng độ).

2.2.2.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ lấp đầy

Srinivasan và cộng sự [81] đã nghiên cứu tác động của tỷ lệ lấp đầy lên các tính chất cơ học của các bộ phận PETG được chế tạo thông qua FDM với độ dày lớp cố định. Nghiên cứu kết luận rằng việc giảm tỷ lệ lấp đầy từ 100% xuống 20% đã làm giảm UTS từ 32,1 MPa xuống 17,4 MPa (giảm 45%) và tăng độ nhám bề mặt (R_a) từ 2,8 μ m đến 3,8 μ m. Tăng tỷ lệ lấp đầy lên 100% dẫn đến bề mặt mịn hơn. Một nghiên cứu khác của Srinivasan et al. [80] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số FDM

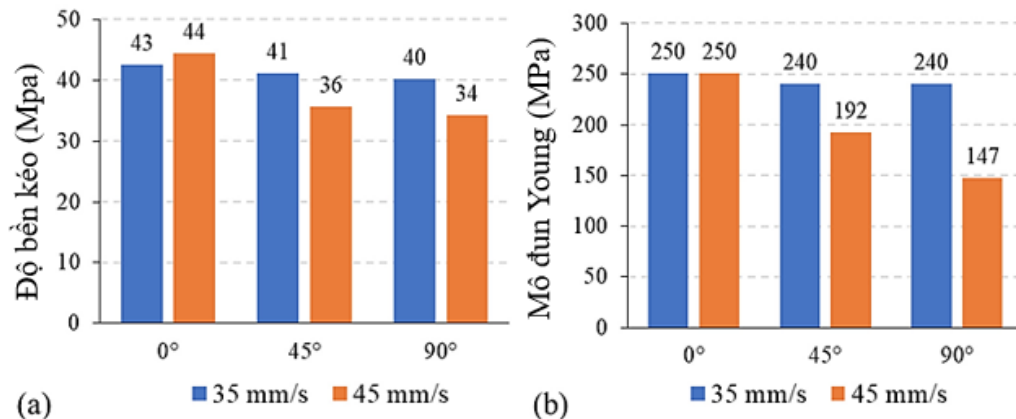
bằng cách thay đổi độ dày lớp, tỷ lệ lấp đầy và mẫu lấp đầy. Họ kết luận rằng UTS tăng lên khi tỷ lệ lấp đầy tăng (Hình 2.10a). Mặt khác, việc tăng tỷ lệ lấp đầy làm giảm độ nhám bề mặt (Hình 2.10b).



Hình 2.10. Tác động của tỷ lệ lấp đầy với các hình dạng mẫu khác nhau trên (a) UTS và (b) độ nhám bề mặt

2.2.2.4. Ảnh hưởng của tốc độ in

Một nghiên cứu trong [82] đã nghiên cứu tác động của tốc độ in lên độ cứng, độ bền kéo và độ bền uốn của PETG. Nó đưa ra dạng mối quan hệ để tối ưu hóa các tính chất cơ học. Kết quả cho thấy việc tăng tốc độ in làm giảm nhẹ độ bền kéo và độ bền uốn nhưng làm tăng nhẹ độ cứng (trong BHN). Một nghiên cứu trong [79] cho thấy tốc độ in ảnh hưởng đến độ bền kéo và uốn. Nghiên cứu đã điều tra ảnh hưởng của tốc độ in với các độ dày lớp khác nhau (0,17, 0,23 và 0,3 mm). Nghiên cứu đã đưa ra kết quả tương tự như [82]; độ bền kéo và uốn giảm khi tốc độ in tăng bất kể độ dày lớp. Ngoài ra, một nghiên cứu trong [50] đã nêu rằng độ bền kéo và mô đun Young hầu như không bị ảnh hưởng bởi tốc độ in. Độ bền cao nhất đạt được ở tốc độ in thấp nhất (Hình 2.11 a,b). Nguyên nhân chủ yếu là do tốc độ in cao không đủ thời gian để sợi nhựa bám dính vào các lớp trước, đặc biệt là đối với các bộ phận nhỏ.



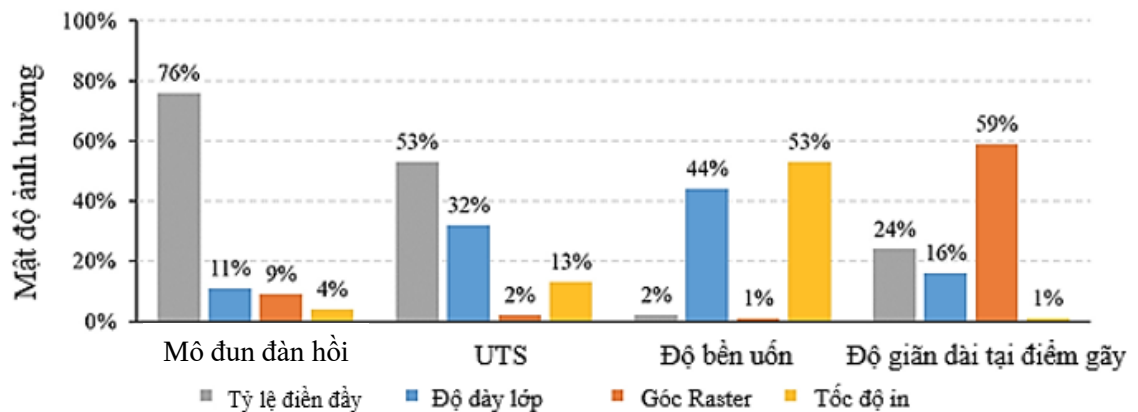
Hình 2.11. PETG (a) sức mạnh và (b) Độ nhay mô đun Young với tốc độ in ở các góc raster khác nhau (tính bằng độ).

2.2.2.5. Nghiên cứu độ nhay của tính chất cơ học PETG bằng ANOVA

Phạm vi cho mỗi tham số quy trình được tóm tắt trong Bảng 2.3. Hình 2.12 cho thấy mô đun Young bị ảnh hưởng đáng kể bởi tỷ lệ lấp đầy. UTS chủ yếu bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ lấp đầy và độ dày lớp. Ngoài ra, độ bền uốn bị ảnh hưởng rất nhiều bởi tốc độ in và độ dày lớp. Độ giãn dài khi đứt được xác định bởi góc raster và tỷ lệ lấp đầy. Các thông số quy trình được xếp hạng trong Bảng 2.4 theo ảnh hưởng của chúng đến các tính chất cơ học đã chỉ định của PETG.

Bảng 2.3. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho vật liệu PETG cùng với các cài đặt liên quan

Thang số	Phạm vi lựa chọn	Thấp	Trung bình	Cao
Góc raster	0°–90°	0°	45°	90°
Độ dày lớp	0.2–0.4 mm	0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm
Tỷ lệ điền đầy	50%–100%	50%	75%	100%
Tốc độ in	15–35 mm/s	15 mm/s	25 mm/s	35 mm/s



Hình 2.12. Ảnh hưởng tương đối của thông số quy trình đến tính chất cơ học của PETG.

Bảng 2.4. Bảng xếp hạng các thông số theo mức độ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của PETG được xác định bằng ANOVA.

Tính chất vật liệu	Thứ nhất	Thứ hai	Thứ ba	Thứ tư
Mô đun đàn hồi (Young's Modulus)	Tỷ lệ lấp đầy	Độ dày lớp in	Góc raster	Tốc độ in
Giới hạn bền kéo (UTS)	Tỷ lệ lấp đầy	Độ dày lớp in	Tốc độ in	Góc raster
Độ bền uốn (Flexural Strength)	Tốc độ in	Độ dày lớp in	Tỷ lệ lấp đầy	Góc raster
Độ giãn dài tại điểm gãy (Elongation at break)	Góc raster	Tỷ lệ lấp đầy	Độ dày lớp in	Tốc độ in

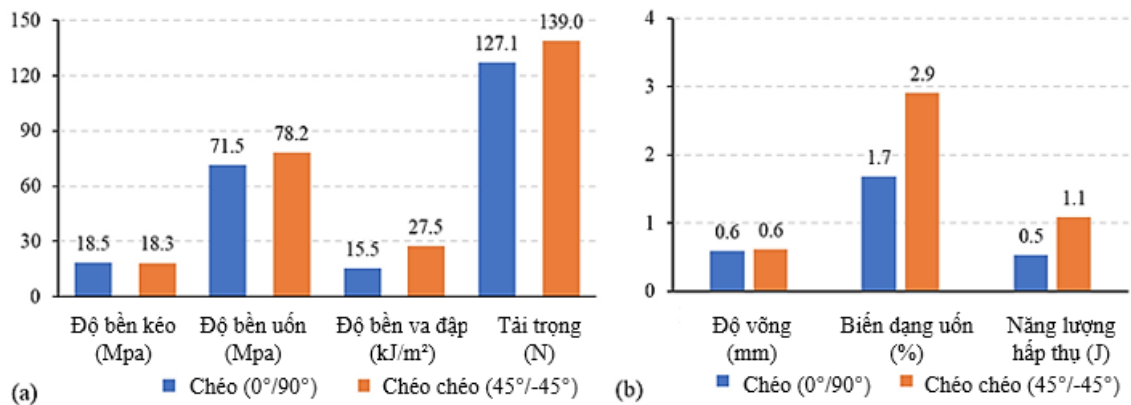
2.2.3. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene):

ABS là một loại polyme vô định hình và nhiệt dẻo thường được sử dụng trong các kỹ thuật FDM. Nó không phân hủy sinh học nhưng vẫn được đùn ở nhiệt độ cao. Nó được biết đến với khả năng chống va đập và độ bền vượt trội. Nó được sử dụng trong máy tính, ống, thuyền và đồ chơi LEGO [63].

2.2.3.1. Ảnh hưởng của góc

Raster Fatimatuzahraa và cộng sự [83] đã nghiên cứu tác động của các góc raster khác nhau lên các đặc tính cơ học của các bộ phận FDM làm bằng vật liệu ABS. Họ định nghĩa các góc raster như sau: trực (0°), chéo nhau ($45^\circ/-45^\circ$), chéo ($0/90^\circ$), và ngang (90°). Các mẫu chéo và chéo chéo cho thấy sự khác biệt không đáng

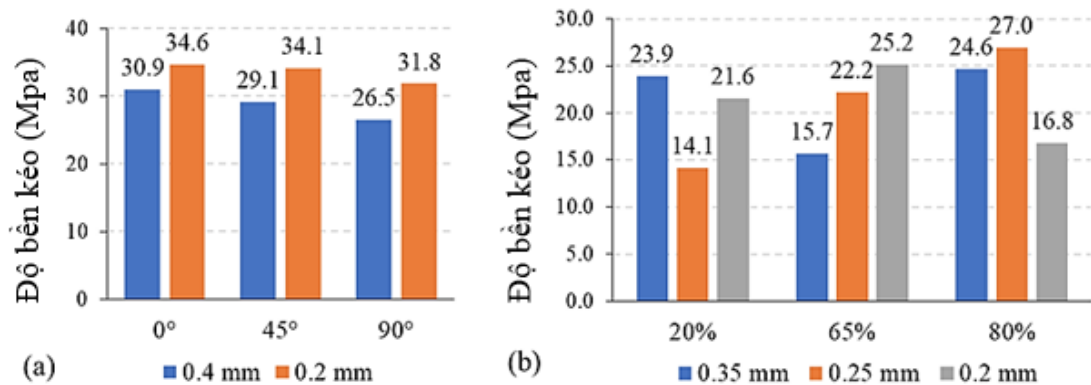
kể về độ bền kéo lần lượt là 18,5 MPa và 18,3 MPa. Các thử nghiệm độ võng cho thấy các mẫu chéo chéo có thể chịu được độ giãn dài nhiều hơn khoảng 3% so với các mẫu chéo. Hơn nữa, kết quả thử nghiệm uốn cho thấy các mẫu chéo chéo mạnh hơn khoảng 9% so với các mẫu chéo. Hơn nữa, các thử nghiệm va đập cho thấy các mẫu chéo chéo có độ bền va đập cao hơn các mẫu chéo. Các phát hiện của nghiên cứu được tóm tắt trong Hình 2.13 a,b. Ngoài ra, Sood et al. [10] kết luận rằng các góc raster nhỏ sẽ tạo ra các raster dài làm tăng sự tích tụ ứng suất theo hướng lắng đọng. Tuy nhiên, các góc raster nhỏ nghiêng theo hướng tải, giúp cải thiện độ bền của bộ phận. Ziemian và cộng sự [84, 85] cũng đã xác định bằng thực nghiệm rằng raster phải được căn chỉnh theo chiều dài nhất để có được độ bền kéo và nén cao nhất cho ABS.



Hình 2.13. Tác động của góc quét lên các tính chất cơ học khác nhau (a,b) của ABS.

2.2.3.2. Ảnh hưởng của độ dày lớp

Một nghiên cứu trong [86] đã kiểm tra thực nghiệm độ nhảy của độ bền vật liệu với các độ dày lớp khác nhau trong các mẫu được thiết kế theo tiêu chuẩn ASTM D638. Độ dày lớp được sử dụng là 0,2 và 0,4 mm và góc quét là 0° , 45° và 90° . Kết quả cho thấy hiệu ứng vừa phải, như trình bày trong Hình 2.14a. Một nghiên cứu gần đây trong [87] đã nghiên cứu độ nhảy của độ bền kéo và độ nén của ABS với độ dày lớp. Kết quả cho thấy độ bền kéo và độ nén giảm khi độ dày lớp tăng. Ngoài ra, một nghiên cứu trong [88] đã nghiên cứu tác động của các độ dày lớp khác nhau với tỷ lệ lấp đầy khác nhau (Hình 2.14b). Thật không may, kết quả không tuân theo một mô hình thông thường nào và khó diễn giải.

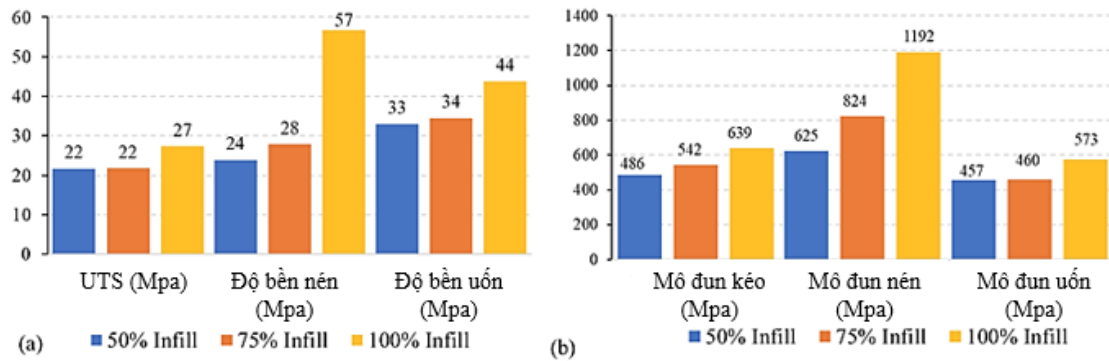


Hình 2.14. (a) Độ nhảy của độ bền kéo ABS với độ dày lớp với các góc quét khác nhau (tính bằng độ) và (b) với các tỷ lệ lấp đầy khác nhau (tính theo %)

2.2.3.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ lấp đầy

Baich và cộng sự [89] đã nghiên cứu tác động của tỷ lệ phần trăm lấp đầy lên độ bền cơ học và chi phí in cho các bộ phận ABS in 3D được sản xuất bằng cách sử dụng tỷ lệ phần trăm lấp đầy là 50%, 75% và 100%. Họ phát hiện ra rằng các mẫu được sản xuất với tỷ lệ lấp đầy 100% có hiệu suất tốt hơn các mẫu được sản xuất với tỷ lệ lấp đầy 50% đối với tất cả các tính chất cơ học, như thể hiện trong Hình 2.15a,b. Yadav và cộng sự [90] cho thấy UTS tăng 20% khi tỷ lệ lấp đầy tăng từ 20% đến 60%. Samykano et al. [91] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số in, bao gồm tỷ lệ lấp đầy, đến các đặc tính cơ học của ABS in FDM và đề xuất một mô hình toán học dự đoán các đặc tính này theo phương pháp số thông qua phương pháp bề mặt phản ứng. Kết quả cho thấy độ bền kéo và mô đun Young cải thiện đáng kể khi tỷ lệ

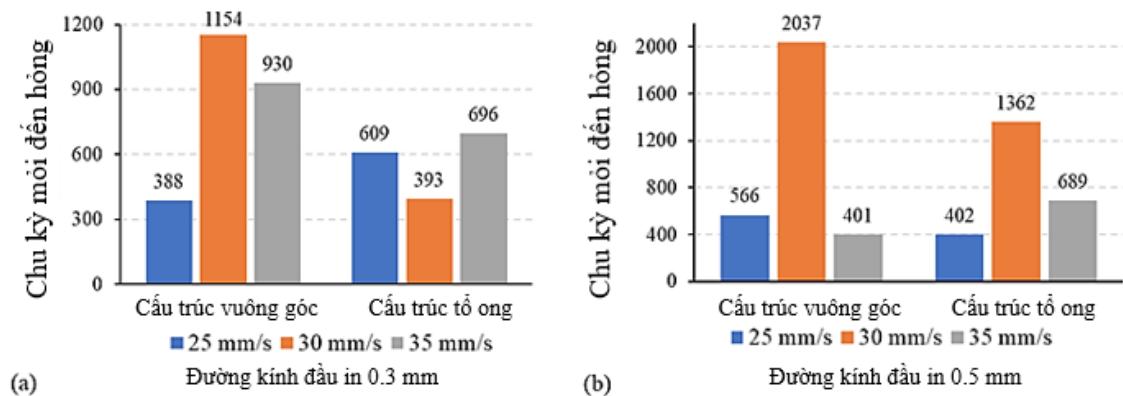
lấp đầy tăng. Hơn nữa, một nghiên cứu của Panes et al. [70] kết luận rằng việc tăng tỷ lệ lấp đầy từ 20% lên 50% đối với ABS sẽ cải thiện UTS lên 26%, ứng suất chảy lên 24%, mô đun Young lên 45% và độ giãn dài khi đứt lên 1%.



Hình 2.15. Tác động của các tỷ lệ lấp đầy khác nhau lên các đặc tính khác nhau của ABS trong (a,b)

2.2.3.4. Ảnh hưởng của tốc độ in

Một nghiên cứu trong [92] đã nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ in đến độ bền kéo của ABS với độ dày lớp khác nhau (0,1 và 0,3 mm) và nhiệt độ máy đùn (230°C và 270°C). Nghiên cứu kết luận rằng việc tăng tốc độ in ảnh hưởng tiêu cực đến độ bền kéo của tất cả các độ dày lớp và nhiệt độ máy đùn. Thông thường, khi tăng tốc độ in, chiều rộng đùn sẽ giảm. Hiệu ứng này làm giảm sự lắng đọng vật liệu và các lỗ rỗng nhỏ bên trong bộ phận in làm bộ phận đó yếu đi. Một nghiên cứu khác trong [45] đã kiểm tra tác động của ba tốc độ in khác nhau (30, 35 và 40 mm/giây) lên độ bền kéo. Nghiên cứu đã đưa ra kết quả tương tự: độ bền kéo giảm từ 15,5 MPa xuống 13,7 MPa. Ngoài ra, một nghiên cứu trong [93] đã nghiên cứu độ nhạy của hiệu suất mỗi uốn cong quay của ABS với tốc độ in (25, 30, 35 mm/giây). Nghiên cứu kết luận rằng các tốc độ in và tỷ lệ lấp đầy khác nhau có tác động vừa phải đến chu kỳ mỏi đến hỏng của ABS (Hình 2.16 a,b). Tuy nhiên, nghiên cứu cho thấy rằng các mẫu in có ảnh hưởng đáng kể hơn tốc độ in đến tuổi thọ chịu mỏi của ABS.



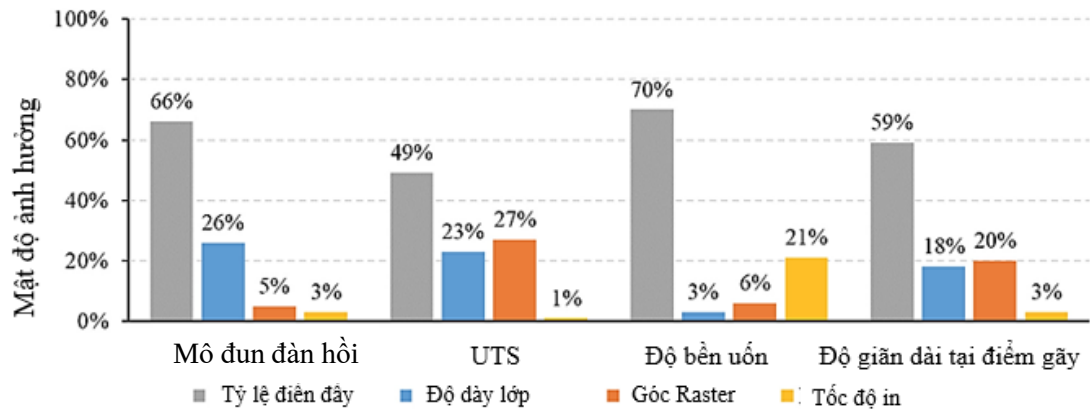
Hình 2.16. Độ nhạy tuổi thọ mỏi của ABS đối với tốc độ in với các mẫu in và đường kính vòi phun khác nhau của (a) 0,3 mm và (b) 0,5mm.

2.2.3.5. Nghiên cứu độ nhạy của đặc tính cơ học

ABS sử dụng ANOVA Phạm vi cho mỗi tham số quy trình được tóm tắt trong Bảng 2.5. Hình 2.17 cho thấy mô đun Young bị ảnh hưởng đáng kể bởi tỷ lệ lấp đầy và độ dày lớp. UTS chủ yếu bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ lấp đầy và góc raster. Ngoài ra, độ bền uốn bị ảnh hưởng rất nhiều bởi tỷ lệ lấp đầy và tốc độ in. Độ giãn dài khi đứt được xác định bởi tỷ lệ lấp đầy và góc raster. Các thông số quy trình được xếp hạng trong Bảng 2.6 theo ảnh hưởng của chúng tới các tính chất cơ học đã chỉ định của ABS.

Bảng 2.5. Phạm vi thông số quy trình được sử dụng cho ABS cùng với các cài đặt liên quan.

Thang số	Phạm vi lựa chọn	Thấp	Trung bình	Cao
Góc raster	0°–90°	0°	45°	90°
Độ dày lớp	0.1–0.3 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm
Tỷ lệ điền đầy	60%–100%	60%	80%	100%
Tốc độ in	20–40 mm/s	20 mm/s	30 mm/s	40 mm/s



Hình 2.17. Ảnh hưởng tương đối của thông số quy trình đến tính chất cơ học của ABS

Bảng 2.6. Bảng xếp hạng các thông số theo mức độ ảnh hưởng đến tính chất cơ học của ABS được xác định bằng ANOVA.

Tính chất vật liệu	Thứ nhất	Thứ hai	Thứ ba	Thứ tư
Mô đun đàn hồi (Young's Modulus)	Tỷ lệ đổ đầy	Độ dày lớp	Góc raster	Tốc độ in
Giới hạn bền kéo (UTS)	Tỷ lệ đổ đầy	Độ dày lớp	Góc raster	Tốc độ in
Độ bền uốn (Flexural Strength)	Tỷ lệ đổ đầy	Tốc độ in	Góc raster	Độ dày lớp
Độ giãn dài tại điểm gãy (Elongation at break)	Tỷ lệ đổ đầy	Góc raster	Độ dày lớp	Tốc độ in

2.3. THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP KIỂM TRA ỨNG SUẤT KÉO

2.3.1. Thiết bị Tạo mẫu.

Để tiến hành thí nghiệm đề tài dùng 2 loại máy in 3D: Anycubic Mega S và Creality K1C. Đại diện cho các dòng máy in phổ biến hệ hở và hệ lồng kín.

Anycubic Mega S là dòng máy in 3D FDM được thiết kế cho người dùng phổ thông và chuyên nghiệp, nổi bật với độ ổn định cao, giá thành hợp lý và khả năng in chính xác. Máy hỗ trợ nhiều loại vật liệu phổ biến như PLA, ABS, TPU, PETG. Máy có khung kim loại chắc chắn, màn hình cảm ứng màu và hệ thống treo cuộn filament riêng biệt, giúp quá trình in ổn định và ít rung lắc.

Creality K1C là phiên bản nâng cấp của dòng K1, nổi bật với tốc độ in cực cao (lên đến 600 mm/s) và tích hợp nhiều công nghệ hiện đại như AI Camera, cảm biến tự động cân bàn, hệ thống làm mát hiệu quả. Máy hỗ trợ nhiều loại vật liệu từ cơ bản đến kỹ thuật như PLA, PETG, ABS, Nylon, Carbon Fiber. Thiết kế dạng vỏ kín giúp duy trì nhiệt độ ổn định, phù hợp in các chi tiết yêu cầu độ chính xác cao.



Hình 2.18. Máy in 3D Anycubic mega S



Hình 2.19. Máy in 3D Creality K1C

Bảng 2.7. Bảng thông số kỹ thuật của máy in

Thông số	Anycubic Mega S	Creality K1C
Công nghệ in	FDM (Fused Deposition Modeling)	FDM (Fused Deposition Modeling)
Kích thước in (mm)	210 x 210 x 205	220 x 220 x 250
Đường kính vòi phun	0.4 mm	0.4 mm (hỗ trợ 0.6 mm)
Nhiệt độ đầu phun	Tối đa 250°C	Tối đa 300°C
Nhiệt độ bàn in	Tối đa 100°C	Tối đa 120°C
Vật liệu in hỗ trợ	PLA, ABS, TPU, PETG	PLA, ABS, PETG, Nylon, Carbon Fiber
Tốc độ in	20 – 100 mm/s	Lên đến 600 mm/s
Độ phân giải lớp	0.05 – 0.3 mm	0.1 – 0.3 mm
Hiệu chỉnh bàn in	Thủ công	Tự động (AI-assisted Leveling)
Khung máy	Kim loại chắc chắn	Vỏ kín (Enclosed)
Kích thước máy (mm)	405 x 410 x 453	435 x 462 x 526
Khối lượng máy	Khoảng 11 kg	Khoảng 13.5 kg
Màn hình điều khiển	Cảm ứng màu TFT 3.5 inch	Màn hình cảm ứng 4.3 inch
Kết nối	Thẻ SD, USB	Wi-Fi, USB, LAN
Tính năng đặc biệt	Cảm biến hết filament, tiếp tục in sau mất điện	AI Camera, tự động cân bàn, tốc độ siêu nhanh

2.3.2. Thiết bị kiểm tra ứng suất kéo

Kiểm tra ứng suất kéo là một phương pháp quan trọng để xác định các tính chất cơ học của mẫu vật liệu in 3D, đặc biệt đối với các vật liệu như PLA, PETG, và ABS. Phương pháp này giúp xác định độ bền kéo, độ dẫn dài và các đặc tính liên quan khác.

Thiết bị chính được sử dụng trong phương pháp này là máy thử kéo vạn năng (Universal Testing Machine - UTM).

Máy UTM được thiết kế để thực hiện các thí nghiệm đo độ bền kéo của nhiều loại vật liệu khác nhau. Máy UTM bao gồm các bộ phận chính như:

- Khung cố định: Được thiết kế để giữ các bộ phận kẹp mẫu thử, có thể điều chỉnh để phù hợp với kích thước mẫu và loại vật liệu cần kiểm tra.
- Bộ phận giữ mẫu: Kẹp hai đầu của mẫu thử, giúp giữ cố định mẫu trong quá trình kéo. Kẹp mẫu được thiết kế để không làm biến dạng hoặc gây hư hỏng mẫu trước khi thí nghiệm bắt đầu.
- Cảm biến tải trọng: Đo lực tác dụng lên mẫu khi mẫu được kéo dài, từ đó tính toán ra các giá trị ứng suất dựa trên diện tích mặt cắt ngang của mẫu thử.



Hình 2.20. Máy BESTUTM 050MD

Máy BESTUTM 050MD, một dòng máy phổ biến, được trang bị cảm biến tải trọng với khả năng đo lên đến 50 kN, giúp cung cấp độ chính xác cao cho các thử nghiệm kéo mẫu in 3D từ vật liệu nhựa như PLA, PETG và ABS. Với thiết kế tiên tiến, máy này được sử dụng trong các phòng thí nghiệm và các cơ sở kiểm định để kiểm tra tính chất cơ học của vật liệu theo tiêu chuẩn quốc tế.

2.3.3. Phương pháp kiểm tra ứng suất kéo theo tiêu chuẩn ASTM D638

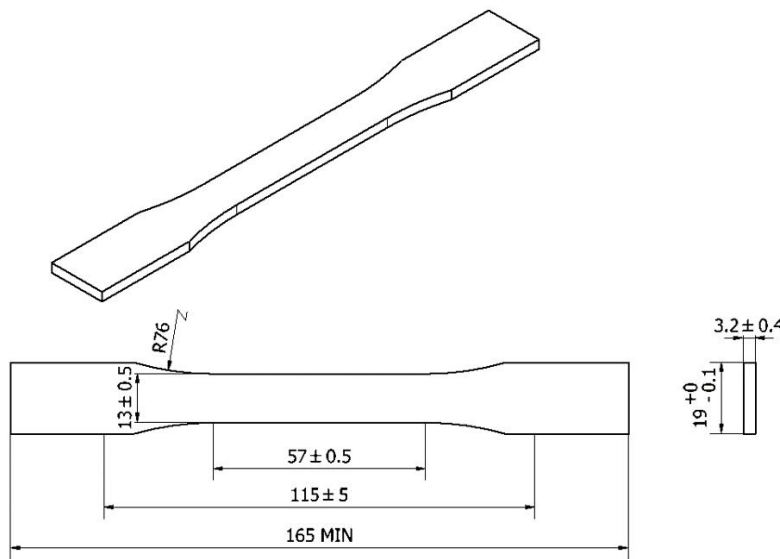
Thí nghiệm kiểm tra ứng suất kéo thường được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM D638, một tiêu chuẩn quốc tế quy định các bước thực hiện và chuẩn bị mẫu thử để đảm bảo tính nhất quán và chính xác của các thí nghiệm. Phương pháp này được áp dụng phổ biến trong kiểm tra các vật liệu nhựa in 3D.

Các bước chính của phương pháp kiểm tra ứng suất kéo bao gồm:

a) Chuẩn bị mẫu thử:

Mẫu thử được in theo kích thước và hình dạng tiêu chuẩn ASTM D638, với dạng chữ I (dog bone) để tập trung lực kéo tại phần giữa của mẫu. Điều này giúp đảm bảo rằng mẫu sẽ bị đứt tại vị trí chính giữa, nơi chịu lực kéo lớn nhất.

Kích thước của mẫu thử phụ thuộc vào loại vật liệu và yêu cầu kiểm tra, nhưng thường được quy định rõ ràng trong tiêu chuẩn, đảm bảo độ đồng nhất giữa các thí nghiệm.



Hình 2.21. Mẫu thử

b) Tiến hành thí nghiệm:

Mẫu thử được kẹp vào giữa hai đầu kẹp của máy UTM. Mẫu phải được giữ chặt đủ để tránh hiện tượng trượt trong quá trình kéo, nhưng không quá mạnh để làm biến dạng mẫu.

Máy UTM sẽ bắt đầu kéo mẫu với tốc độ được lập trình trước, thường là 5 mm/phút đối với các vật liệu nhựa như PLA và PETG. Trong quá trình kéo, máy sẽ ghi nhận lực tác động và độ giãn dài của mẫu, từ đó tính toán ra các giá trị ứng suất và độ giãn dài.



Hình 2.22. Máy thử nén/kéo vạn năng BESTUTM 050MD - Công suất tải tối đa 50kN.

c) Đo đạc và ghi nhận kết quả:

Khi mẫu bị kéo đứt, máy UTM sẽ ghi nhận ứng suất kéo cực đại (ứng suất tại thời điểm đứt) và độ giãn dài (mức độ kéo giãn của mẫu trước khi đứt). Các dữ liệu này sau đó sẽ được hệ thống máy phân tích và hiển thị trên màn hình hoặc xuất ra báo cáo chi tiết.

Các chỉ số quan trọng bao gồm ứng suất kéo cực đại và độ giãn dài tương đối, cho thấy khả năng chịu kéo và tính dẻo dai của vật liệu.



Hình 2.23. Biểu đồ thể hiện quá trình kéo mẫu trên phần mềm mẫu 22

Biểu đồ thể hiện rõ giai đoạn:

1) Linear Region: Đây là phần của đồ thị căng-co giãn mà các mẫu đều biểu hiện sự đàn hồi đàn hồi tuyến tính;

2) Yield Point: Đây là điểm trên đồ thị căng-co giãn khi mẫu bắt đầu trải qua sự biến dạng vĩnh viễn sau một giai đoạn đàn hồi tuyến tính ban đầu;

3) Elongation Region: Sau Yield Point, mẫu bắt đầu giãn dài một cách không đều đặn và không đàn hồi tuyến tính;

4) Fracture Region: Đây là giai đoạn cuối cùng của quá trình, nơi mẫu chịu sự căng đứt hoặc gãy. Đây là 1 biểu đồ điển hình cho quá trình thử ứng suất kéo.

Để xác định giới hạn bền ta quan sát trong giai đoạn thứ 3:

$$\sigma_b = \frac{P_B}{F_0}; (\text{N/cm}^2, \text{kN/m}^2, \text{kN/mm}^2 \dots) \quad (2.24)$$

Trong đó:

P_B : Lực tương ứng với giới hạn bền của vật liệu (tính bằng N, KN).

F_0 : Diện tích mặt cắt ngang của mẫu trước khi thí nghiệm (tính bằng cm^2 , $\text{mm}^2 \dots$).

2.3.4. Phân tích kết quả thí nghiệm

Sau khi hoàn tất thí nghiệm, các dữ liệu được thu thập từ máy thử kéo sẽ được phân tích để đánh giá tính chất cơ học của vật liệu. Các thông số cơ bản cần xem xét bao gồm:

Ứng suất kéo cực đại (Ultimate Tensile Strength): Đây là giá trị ứng suất cao nhất mà mẫu chịu được trước khi bị đứt. Đây là một thông số quan trọng để đánh giá khả năng chịu kéo của vật liệu.

Độ dẫn dài tương đối (Elongation at Break): Được tính bằng tỉ lệ giữa độ giãn dài của mẫu tại thời điểm đứt và chiều dài ban đầu của mẫu. Thông số này cho biết độ dẻo dai của vật liệu - vật liệu có độ dẫn dài cao thường có khả năng chịu biến dạng tốt trước khi đứt.

Những kết quả này sẽ được so sánh với các nghiên cứu trước đó để xác định liệu các tham số in 3D (như nhiệt độ đầu in, tốc độ in, và tỷ lệ điền đầy) có ảnh hưởng đến cơ tính của vật liệu hay không. Ví dụ, các thí nghiệm có thể chỉ ra rằng việc tăng nhiệt độ đầu in từ 190°C lên 220°C có thể cải thiện độ bền kéo của vật liệu PLA, hoặc giảm tốc độ in có thể tăng khả năng kết dính giữa các lớp, làm tăng độ bền tổng thể của sản phẩm in.

2.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Trong chương này, nghiên cứu đã phân tích các loại vật liệu phổ biến như PLA, PETG và ABS. Mỗi loại vật liệu đều có những tính chất cơ học và nhiệt học riêng biệt, điều này ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và tính năng của sản phẩm in. Ngoài ra, các thông số công nghệ như nhiệt độ đầu in, nhiệt độ bàn in, độ dày lớp, tỷ lệ điền

đầy, và hướng in đều đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa quá trình in và cải thiện cơ tính của chi tiết in 3D.

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc điều chỉnh phù hợp các thông số này sẽ giúp tăng cường đáng kể độ bền cơ học, độ dẻo dai và khả năng chịu tải của sản phẩm in 3D. Điều này đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng kỹ thuật yêu cầu độ chính xác và độ bền cao.

Việc hiểu rõ ảnh hưởng của từng thông số không chỉ giúp tối ưu hóa quá trình in 3D mà còn mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi hơn trong nhiều lĩnh vực sản xuất công nghiệp, từ y tế, hàng không đến sản xuất linh kiện cơ khí và điện tử.

Xác định được các thiết bị và phương pháp thí nghiệm: Máy thử nén/kéo vạn năng BESTUTM 050MD, Máy in 3D Anycubic Mega S, Máy in 3D Creality K1C , PLA, PETG, ABS, phần mềm phân tích số liệu Minitab.

Xác định được tham số thí nghiệm: nhiệt độ đầu in(T-printing), nhiệt bàn in (Tbed), độ dày lớp(h-layer) và tốc độ in(v-printing).

CHƯƠNG 3 - THÍ NGHIỆM VÀ XỬ LÝ SỐ LIỆU

3.1. THIẾT KẾ MA TRẬN THÍ NGHIỆM.

Trong chương này, nghiên cứu sẽ tiến hành thiết kế các thí nghiệm để kiểm tra và đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến cơ tính của chi tiết in 3D. Để đảm bảo tính khoa học và khách quan, thí nghiệm sẽ được thực hiện theo phương pháp thiết kế ma trận thí nghiệm với nhiều tổ hợp thông số in khác nhau. Các thông số này bao gồm: nhiệt độ đầu in, nhiệt độ bàn in, tốc độ in, độ dày lớp, và nhiệt độ bàn in. Nghiên cứu sẽ thí nghiệm với ba loại vật liệu phổ biến trong công nghệ FDM: PLA, PETG và ABS.

3.1.1. Vật liệu PLA

PLA (Polylactic Acid) có đặc tính giòn hơn so với các vật liệu khác, và không chịu nhiệt độ cao tốt. Trong các thí nghiệm, nghiên cứu sẽ kiểm tra sự ảnh hưởng của các thông số như nhiệt độ đầu in, độ dày lớp và tốc độ in đến độ bền kéo, độ cứng và độ dẻo dai của chi tiết in.

- Nhiệt độ đầu in: 190 – 230 °C
- Nhiệt độ bàn in: 30 – 60 °C
- Tốc độ in: 40 – 80 mm/s
- Độ dày lớp: 0.1 – 0.3 mm

Ma trận thí nghiệm của vật liệu PLA sẽ bao gồm các tổ hợp của bốn thông số như trong Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Các tham số đầu vào của vật liệu PLA được sắp xếp theo phương pháp thí nghiệm Box-Behnken

Tham số đầu vào	Đơn vị	Ký hiệu	Giá trị của các mức		
			-1	0	1
Nhiệt độ đầu in	°C	T-printing	190	210	230
Tốc độ in	mm/s	v-printing	40	60	80
Độ dày lớp in	mm	h-layer	0,1	0,2	0,3
Nhiệt độ bàn in	°C	T-bed	30	45	60

3.1.2. Vật liệu PETG

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) yêu cầu nhiệt độ in cao hơn PLA và thường dễ bị hiện tượng dây vật liệu khi in.

- Nhiệt độ đầu in: 230 – 250 °C
- Nhiệt độ bàn in: 60 – 80 °C
- Tốc độ in: 40 – 80 mm/s
- Độ dày lớp: 0.1 – 0.3 mm

Đối với PETG, ma trận thí nghiệm được thiết lập theo Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Các tham số đầu vào của vật liệu PETG được sắp xếp theo phương pháp thí nghiệm Box-Behnken

Tham số đầu vào	Đơn vị	Ký hiệu	Giá trị của các mức		
			-1	0	1
Nhiệt độ đầu in	°C	T-printing	230	240	250
Tốc độ in	mm/s	v-printing	40	60	80
Độ dày lớp in	mm	h-layer	0,1	0,2	0,3
Nhiệt độ bàn in	°C	T-bed	60	70	80

3.1.3. Vật liệu ABS

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) là vật liệu được biết đến với độ bền cao và khả năng chịu lực tốt, nhưng lại khó in hơn PLA và PETG do yêu cầu cao về nhiệt độ in và khả năng dễ cong vênh khi in. ABS có khả năng chịu nhiệt tốt hơn, do đó thường được sử dụng cho các ứng dụng yêu cầu độ bền cơ học và nhiệt độ cao.

- Nhiệt độ đầu in: 240 – 260 °C
- Nhiệt độ bàn in: 80 – 100 °C (bắt buộc)
- Tốc độ in: 100 – 200 mm/s
- Độ dày lớp: 0.1 – 0.3 mm

Ma trận thí nghiệm của ABS được thiết lập theo Bảng 3.3.

Bảng 3.3. Các tham số đầu vào của vật liệu ABS được sắp xếp theo phương pháp thí nghiệm Box-Behnken

Tham số đầu vào	Đơn vị	Ký hiệu	Giá trị của các mức		
			-1	0	1
Nhiệt độ đầu in	°C	T-printing	240	250	260
Tốc độ in	mm/s	v-printing	100	150	200
Độ dày lớp in	mm	h-layer	0,1	0,2	0,3
Nhiệt độ bàn in	°C	T-bed	80	90	100

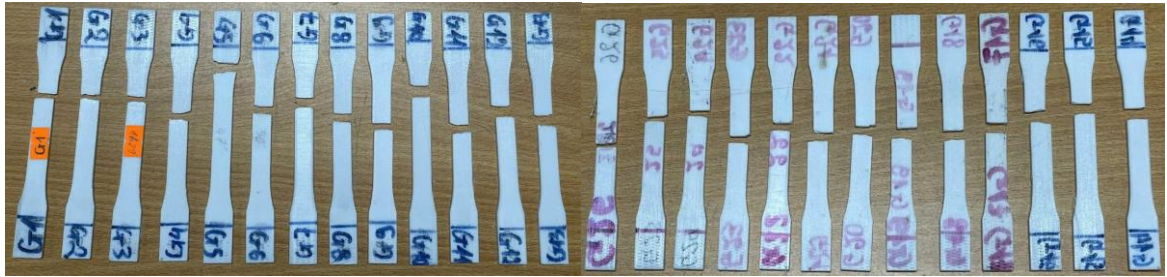
3.2. THU TẬP VÀ XỬ LÝ SỐ LIỆU

3.2.1. Vật liệu PLA

Bảng 3.4 trình bày ma trận thí nghiệm Box-Behnken được thực hiện với 27 thí nghiệm. Kết quả cho thấy mẫu có độ bền cao nhất chịu được là 0.045 kN/mm², tương ứng với Nhiệt độ in 210°C, Tốc độ in 80 mm/s, Độ dày lớp 0.2 mm và Nhiệt độ bàn in 60°C. Thời gian hoàn thành mẫu này là 48 phút, đây là một trong những thời gian in ngắn nhất trong số tất cả các mẫu.

Bảng 3.4. Ma trận thí nghiệm Box-Behnken và kết quả với vật liệu PLA

RunOrder	T-printing (°C)	v-printing (mm/s)	h-layer (mm)	T-bed (°C)	t-printing (phút)	Strength (kN/mm ²)
1	210	60	0.2	45	60	0.046
2	210	40	0.2	30	85	0.049
3	210	80	0.3	45	36	0.045
4	190	60	0.2	30	60	0.045
5	210	60	0.3	30	45	0.042
6	210	60	0.1	30	119	0.037
7	190	60	0.2	60	60	0.035
8	210	40	0.2	60	85	0.046
9	190	60	0.3	45	45	0.043
10	230	80	0.2	45	48	0.043
11	190	40	0.2	45	85	0.044
12	210	60	0.2	45	60	0.044
13	210	80	0.2	60	48	0.046
14	230	60	0.2	60	60	0.045
15	210	60	0.2	45	60	0.044
16	230	60	0.1	45	119	0.045
17	230	40	0.2	45	85	0.048
18	210	40	0.3	45	62	0.045
19	190	60	0.1	45	119	0.04
20	210	60	0.3	60	45	0.041
21	210	80	0.1	45	93	0.039
22	210	80	0.2	30	48	0.04
23	230	60	0.2	30	60	0.042
24	210	60	0.1	60	119	0.043
25	230	60	0.3	45	45	0.043
26	190	80	0.2	45	48	0.042
27	210	40	0.1	45	170	0.043



Hình 3.1. Mẫu thử nghiệm kéo với vật liệu PLA

3.2.2. Vật liệu PETG

Bảng 3.5 trình bày ma trận thí nghiệm Box-Behnken được thực hiện với 27 thí nghiệm. Kết quả cho thấy mẫu có độ bền cao nhất chịu được là 0.043 kN/mm², tương ứng với Nhiệt độ in 240°C, Tốc độ in 60 mm/s, Độ dày lớp 0.1 mm và Nhiệt độ bàn in 60°C. Thời gian hoàn thành mẫu này là 130 phút, cũng là thời gian in lâu nhất trong số tất cả các mẫu.

Bảng 3.5. Ma trận thí nghiệm Box-Behnken và kết quả với vật liệu PETG

RunOrder	T-printing (°C)	v-printing (mm/s)	h-layer (mm)	T-bed (°C)	t-printing (phút)	Strength (kN/mm ²)
1	230	80	0.2	70	55	0.037
2	250	60	0.2	80	67	0.037
3	250	40	0.2	70	96	0.038
4	240	40	0.2	80	96	0.038
5	230	60	0.3	70	52	0.041
6	240	80	0.2	80	60	0.038
7	230	60	0.1	70	130	0.04
8	230	60	0.2	60	68	0.037
9	240	60	0.2	70	68	0.037
10	240	60	0.3	80	55	0.038
11	250	60	0.3	70	51	0.038
12	240	80	0.1	70	102	0.037
13	240	80	0.3	70	43	0.038
14	240	60	0.1	60	130	0.043
15	240	80	0.2	60	57	0.036
16	250	60	0.2	60	69	0.038
17	240	40	0.3	70	68	0.041
18	240	40	0.2	60	96	0.041
19	240	40	0.1	70	185	0.043
20	250	80	0.2	70	55	0.039

RunOrder	T-printing (°C)	v-printing (mm/s)	h-layer (mm)	T-bed (°C)	t-printing (phút)	Strength (kN/mm ²)
21	240	60	0.2	70	69	0.04
22	250	60	0.1	70	131	0.044
23	230	40	0.2	70	97	0.04
24	240	60	0.2	70	69	0.041
25	230	60	0.2	80	74	0.041
26	240	60	0.3	60	51	0.041
27	240	60	0.1	80	130	0.042



(a) Mẫu từ 1 đến 9

(b) Mẫu từ 10 đến 18

(c) Mẫu từ 19 đến 27

Hình 3.2 Mẫu thử nghiệm kéo với vật liệu PETG

3.2.3. Vật liệu ABS

Bảng 3.6 trình bày ma trận thí nghiệm Box-Behnken được thực hiện với 27 thí nghiệm. Kết quả cho thấy mẫu có độ bền cao nhất chịu được là 0.0439 kN/mm², tương ứng với Nhiệt độ in 240°C, Tốc độ in 150 mm/s, Độ dày lớp 0.3 mm và Nhiệt độ bàn in 90°C. Thời gian hoàn thành mẫu này là 13 phút, là một trong những thời gian in ngắn hơn so với các mẫu khác.

Bảng 3.6. Ma trận thí nghiệm Box-Behnken và kết quả với vật liệu ABS

RunOrder	T-printing (°C)	v-printing (mm/s)	h-layer (mm)	T-bed (°C)	t-printing (phút)	Strength (kN/mm ²)
1	250	150	0.2	90	18	0.023
2	250	200	0.2	100	15	0.024
3	240	150	0.2	80	18	0.028
4	250	150	0.2	90	18	0.028
5	240	200	0.2	90	15	0.026

RunOrder	T-printing (°C)	v-printing (mm/s)	h-layer (mm)	T-bed (°C)	t-printing (phút)	Strength (kN/mm ²)
6	250	200	0.3	90	11	0.029
7	260	100	0.2	90	25	0.031
8	240	150	0.3	90	13	0.033
9	250	150	0.3	80	13	0.033
10	240	150	0.2	100	18	0.027
11	240	150	0.1	90	29	0.029
12	250	100	0.2	100	25	0.031
13	250	150	0.1	100	29	0.031
14	250	100	0.2	80	25	0.025
15	250	200	0.1	90	25	0.025
16	260	150	0.2	80	18	0.024
17	250	150	0.1	80	29	0.025
18	260	200	0.2	90	15	0.025
19	260	150	0.3	90	13	0.032
20	250	150	0.3	100	13	0.030
21	260	150	0.1	90	29	0.028
22	250	100	0.1	90	38	0.030
23	240	100	0.2	90	25	0.029
24	250	200	0.2	80	15	0.027
25	250	100	0.3	90	17	0.034
26	250	150	0.2	90	18	0.027
27	260	150	0.2	100	18	0.029



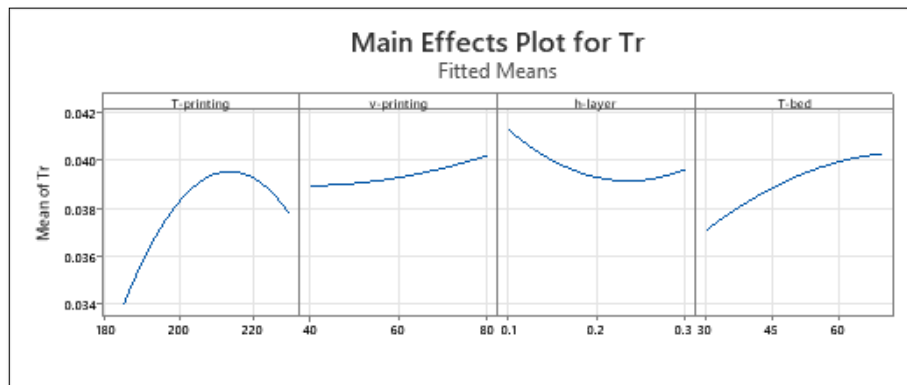
Hình 3.3. Mẫu thử nghiệm kéo với vật liệu ABS

3.3. PHÂN TÍCH SỐ LIỆU.

3.3.1. Vật liệu PLA

Trong phần này, chúng ta sẽ phân tích các biểu đồ và số liệu thu được từ quá trình kiểm tra cơ tính của vật liệu PLA với sự tác động của các tham số in 3D như nhiệt độ đầu in (T-printing), tốc độ in (v-printing), độ dày lớp (h-layer), và nhiệt độ bàn in (T-bed). Dữ liệu bao gồm biểu đồ các yếu tố chính, biểu đồ tương tác, biểu đồ Pareto, và bảng hệ số hồi quy. Qua đó, chúng ta sẽ xác định yếu tố nào ảnh hưởng lớn nhất đến ứng suất kéo (Tr) của mẫu in PLA.

a) Biểu đồ Main Effects

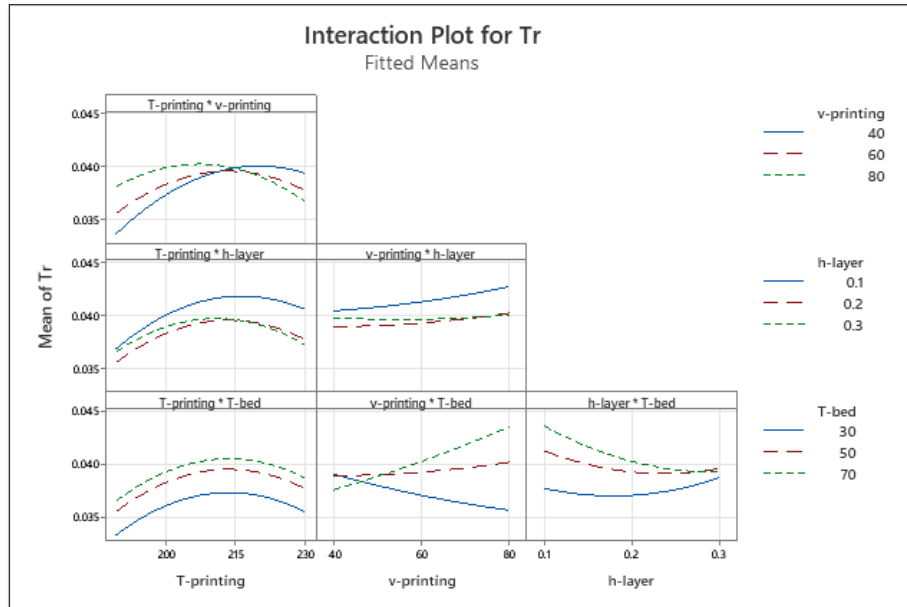


Hình 3.4. Biểu đồ Main Effects

Biểu đồ Main Effects cho thấy ảnh hưởng của từng tham số độc lập đến giá trị Tr. Từ biểu đồ này, có thể thấy rằng:

- T-printing: Ứng suất kéo tăng khi nhiệt độ đầu in tăng từ 180°C lên 200°C, sau đó giảm dần khi nhiệt độ tiếp tục tăng đến 220°C. Điều này có thể giải thích rằng nhiệt độ cao giúp cải thiện độ kết dính giữa các lớp, nhưng khi vượt ngưỡng tối ưu, độ bền cơ học giảm do vật liệu bị nóng chảy quá mức.
- v-printing: Khi tốc độ in tăng từ 40 mm/s lên 80 mm/s, ứng suất kéo tăng nhẹ. Tốc độ in cao giúp tạo ra các lớp mỏng hơn và kết dính tốt hơn.
- h-layer: Ứng suất kéo đạt đỉnh tại độ dày lớp 0.2 mm, cho thấy độ dày lớp vừa phải giúp tối ưu hóa độ bền kéo của sản phẩm. Khi độ dày lớp tăng lên 0.3 mm, ứng suất kéo giảm.

- T-bed: Nhiệt độ bàn in tăng từ 30°C lên 60°C giúp cải thiện đáng kể ứng suất kéo. Điều này có thể do sự ổn định của vật liệu trong quá trình in tăng lên khi bàn in được giữ ở nhiệt độ cao hơn.
- b) Biểu đồ Interaction Effects (Tương tác giữa các yếu tố)

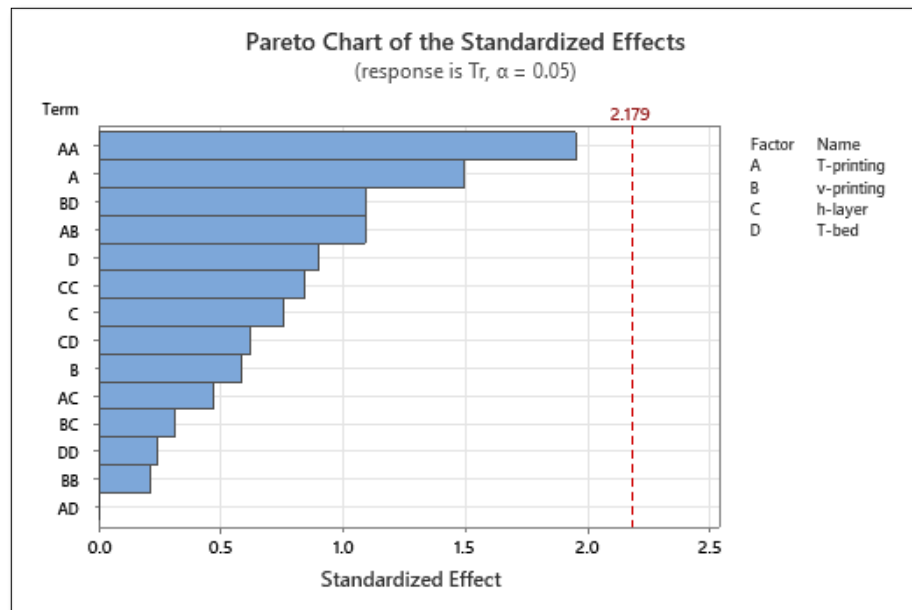


Hình 3.5. Biểu đồ Interaction Effects

Biểu đồ này phân tích sự tương tác giữa các tham số và ảnh hưởng kết hợp của chúng lên giá trị Tr.

- T-printing và v-printing: Ở nhiệt độ đầu in 200°C và tốc độ in 60 mm/s, mẫu in đạt giá trị ứng suất kéo cao nhất. Khi nhiệt độ tăng cao hơn và tốc độ in giảm, giá trị Tr giảm.
- T-printing và h-layer: Độ dày lớp 0.2 mm và nhiệt độ đầu in 200°C là sự kết hợp tối ưu để đạt ứng suất kéo cao. Khi tăng nhiệt độ và độ dày lớp quá cao, ứng suất kéo giảm.
- T-bed và T-printing: Nhiệt độ bàn in cao hơn giúp duy trì sự ổn định và cải thiện ứng suất kéo ở tất cả các mức nhiệt độ đầu in, đặc biệt là ở nhiệt độ in 200°C.

c) Biểu đồ Pareto



Hình 3.6. Biểu đồ Pareto

Biểu đồ Pareto phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố chính và tương tác đến ứng suất kéo. Các yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất bao gồm:

- T-printing (A): Yếu tố này có tác động mạnh nhất đến giá trị Tr.
- Tương tác giữa T-printing và T-printing (AA): Tương tác này thể hiện sự phụ thuộc lớn của ứng suất kéo vào nhiệt độ đầu in.
- Tương tác giữa v-printing và T-bed (BD): Sự kết hợp giữa tốc độ in và nhiệt độ bàn in cũng ảnh hưởng lớn đến giá trị Tr.

d) Bảng hồi quy (Coded Coefficients)

Bảng hồi quy cung cấp các hệ số của các tham số ảnh hưởng đến độ bền kéo (Tr) của mẫu PLA. Dưới đây là phương trình hồi quy tổng quát mô tả mối quan hệ giữa các tham số:

$$\begin{aligned}
 \text{Tr} = & -0.013 + 0.000783 \text{ T-printing} - 0.000415 \text{ v-printing} + 0.245 \text{ h-layer} \\
 & - 0.001919 \text{ T-bed} - 0.000002 \text{ T-printing} * \text{T-printing} + 0.000002 \text{ v-} \\
 & \text{printing} * \text{v-printing} - 0.2042 \text{ h-layer} * \text{h-layer} - 0.000006 \text{ T-bed} * \text{T-bed} \\
 & - 0.000002 \text{ T-printing} * \text{v-printing} - 0.000625 \text{ T-printing} * \text{h-layer}
 \end{aligned}$$

+ 0.000011 T-printing*T-bed + 0.000500 v-printing*h-layer + 0.000008 v-printing*T-bed - 0.001167 h-layer*T-bed

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.04467	0.00114	39.20	0.000	
T-printing	0.001417	0.000570	2.49	0.029	1.00
v-printing	-0.001667	0.000570	-2.93	0.013	1.00
h-layer	0.001000	0.000570	1.76	0.105	1.00
T-bed	0.000083	0.000570	0.15	0.886	1.00
T-printing*T-printing	-0.000917	0.000855	-1.07	0.305	1.25
v-printing*v-printing	0.000958	0.000855	1.12	0.284	1.25
h-layer*h-layer	-0.002042	0.000855	-2.39	0.034	1.25
T-bed*T-bed	-0.001417	0.000855	-1.66	0.123	1.25
T-printing*v-printing	-0.000750	0.000987	-0.76	0.462	1.00
T-printing*h-layer	-0.001250	0.000987	-1.27	0.229	1.00
T-printing*T-bed	0.003250	0.000987	3.29	0.006	1.00
v-printing*h-layer	0.001000	0.000987	1.01	0.331	1.00
v-printing*T-bed	0.002250	0.000987	2.28	0.042	1.00
h-layer*T-bed	-0.001750	0.000987	-1.77	0.102	1.00
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.0019738	81.40%	59.71%	0.00%		

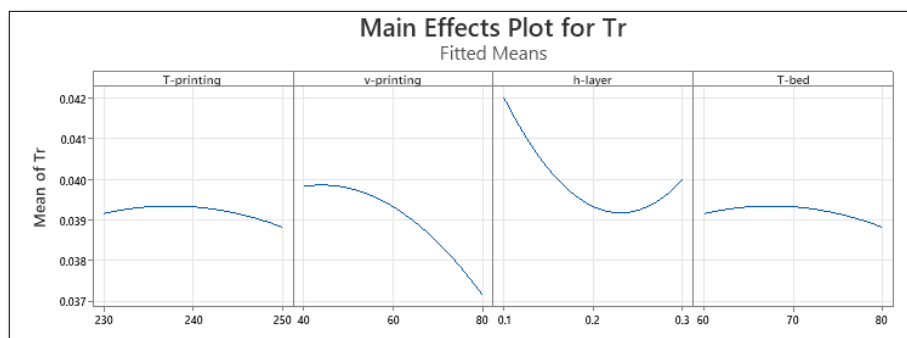
Hình 3.7. Bảng hồi quy

- T-printing (Nhiệt độ đầu in): Hệ số hồi quy dương (+0.001471) và giá trị P-value = 0.029 (<0.05) cho thấy rằng nhiệt độ đầu in có ảnh hưởng đáng kể và tích cực đến độ bền kéo. Khi tăng nhiệt độ đầu in, độ bền kéo có xu hướng cải thiện.
- V-printing (Tốc độ in): Hệ số hồi quy âm (-0.001667) và giá trị P-value = 0.013 (<0.05) chỉ ra rằng tốc độ in cao làm giảm độ bền kéo của mẫu in. Tốc độ in cần được kiểm soát để tránh làm giảm chất lượng sản phẩm.
- H-layer (Độ dày lớp): Hệ số hồi quy dương (+0.000570) với giá trị P-value = 0.016 (<0.05) cho thấy độ dày lớp là yếu tố quan trọng và có ý nghĩa thống kê, ảnh hưởng tích cực đến độ bền kéo. Độ dày lớp lớn hơn giúp cải thiện độ bền của mẫu.

- T-bed (Nhiệt độ bàn in): Hệ số hồi quy dương rất nhỏ (+0.000083) và P-value = 0.885 (>0.05) cho thấy rằng nhiệt độ bàn in không ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kéo. Điều này cho phép giảm nhiệt độ bàn in để tiết kiệm năng lượng mà không ảnh hưởng lớn đến cơ tính.
- T-printing * H-layer: Hệ số hồi quy dương (+0.000750) và P-value = 0.026 (<0.05) cho thấy sự kết hợp giữa nhiệt độ đầu in và độ dày lớp có ảnh hưởng tích cực và ý nghĩa đến độ bền kéo.
- V-printing * T-bed: Hệ số hồi quy dương (+0.002250) với P-value = 0.024 (<0.05) cho thấy sự tương tác giữa tốc độ in và nhiệt độ bàn in cũng có ảnh hưởng đáng kể.
- R-Sq = 81.40%: Cho thấy 81.40% sự biến thiên trong độ bền kéo được giải thích bởi các thông số trong mô hình.
- R-Sq(adj) = 59.71%: Hệ số hiệu chỉnh cho thấy mức độ chính xác của mô hình ở mức trung bình.
- R-Sq(pred) = 0.00%: Khả năng dự đoán của mô hình thấp, điều này cho thấy cần thêm dữ liệu hoặc các tham số khác để cải thiện mô hình.

3.3.2. Vật liệu PETG

a) Biểu đồ Main Effects Plot

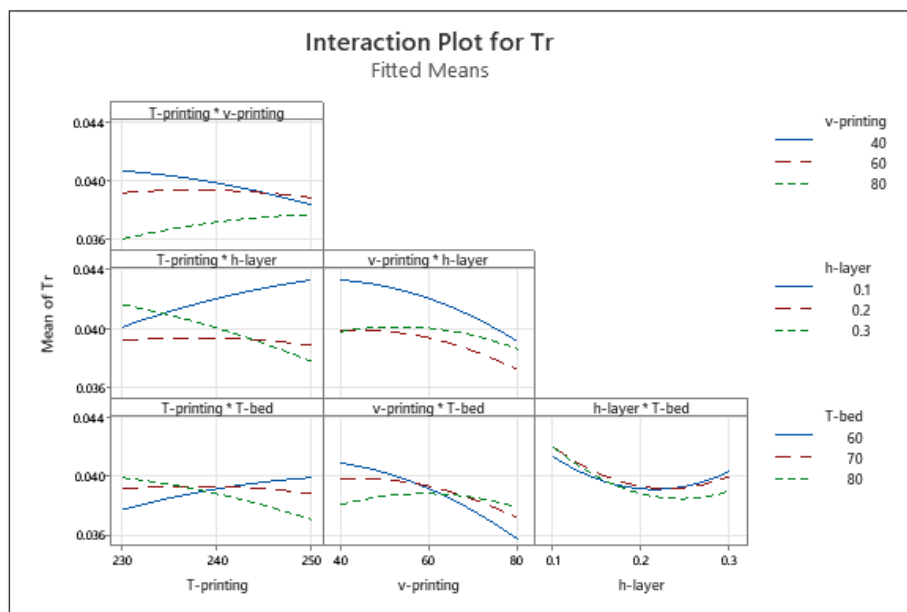


Hình 3.8. Biểu đồ Main Effects Plot

Biểu đồ Main Effects Plot cho thấy sự ảnh hưởng của các tham số in như nhiệt độ đầu in (T-printing), tốc độ in (v-printing), độ dày lớp (h-layer) và nhiệt độ bàn in (T-bed) đến độ bền kéo (Tr) của mẫu PLA:

- T-printing: Khi nhiệt độ đầu in tăng từ 230°C đến 250°C, độ bền kéo có xu hướng giảm nhẹ. Điều này cho thấy rằng khi nhiệt độ đầu in vượt quá một mức tối ưu, tính chất cơ học của mẫu PLA bị giảm do quá trình chảy nhựa không đều và giảm độ kết dính giữa các lớp.
- v-printing: Khi tốc độ in tăng từ 40 mm/s đến 80 mm/s, độ bền kéo có xu hướng giảm. Tốc độ in cao có thể khiến các lớp in không kết dính tốt, dẫn đến mẫu in không đủ bền.
- h-layer: Ứng suất kéo giảm khi độ dày lớp tăng từ 0.1 mm đến 0.2 mm, sau đó bắt đầu tăng khi độ dày đạt 0.3 mm. Điều này có thể được giải thích do độ dày lớp ảnh hưởng đến độ kết dính giữa các lớp nhựa, tạo ra sự chênh lệch trong độ bền kéo.
- T-bed: Nhiệt độ bàn in có ảnh hưởng tích cực khi tăng từ 60°C lên 70°C, tuy nhiên khi tăng đến 80°C, độ bền kéo có xu hướng giảm.

b) Biểu đồ Interaction Plot



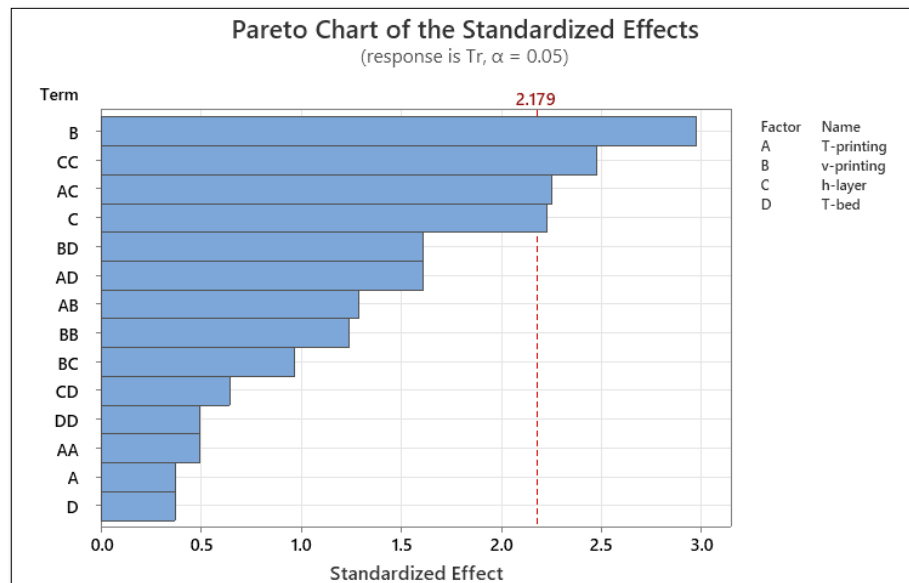
Hình 3.9. Biểu đồ Interaction Plot

Biểu đồ Interaction Plot cho thấy sự tương tác giữa các tham số:

- T-printing và v-printing: Khi tăng nhiệt độ đầu in và giảm tốc độ in, độ bền kéo tăng. Điều này cho thấy rằng sự kết hợp giữa nhiệt độ đầu in cao và tốc độ in thấp giúp cải thiện độ bền kéo.

- T-printing và h-layer: Khi nhiệt độ đầu in cao và độ dày lớp giảm, độ bền kéo tăng. Điều này cho thấy rằng độ dày lớp thấp giúp duy trì độ bền kéo tốt khi nhiệt độ đầu in cao.
- v-printing và h-layer: Sự kết hợp giữa tốc độ in cao và độ dày lớp thấp có xu hướng làm giảm độ bền kéo.

c) Biểu đồ Pareto



Hình 3.10. Biểu đồ Pareto

Biểu đồ Pareto chỉ ra các tham số ảnh hưởng nhiều nhất đến độ bền kéo của mẫu in PLA:

- v-printing (B): Tốc độ in là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền kéo với giá trị Standardized Effect cao nhất (lớn hơn ngưỡng 2.179).
- h-layer (C) và tương tác giữa T-printing và v-printing (AC) cũng ảnh hưởng đáng kể.
- Nhiệt độ đầu in T-printing (A) và nhiệt độ bàn in T-bed (D) có ảnh hưởng, nhưng không quá lớn so với các yếu tố khác.

d) Bảng hồi quy (Coded Coefficients)

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.039333	0.000898	43.82	0.000	
T-printing	-0.000167	0.000449	-0.37	0.717	1.00
v-printing	-0.001333	0.000449	-2.97	0.012	1.00
h-layer	-0.001000	0.000449	-2.23	0.046	1.00
T-bed	-0.000167	0.000449	-0.37	0.717	1.00
T-printing*T-printing	-0.000333	0.000673	-0.50	0.629	1.25
v-printing*v-printing	-0.000833	0.000673	-1.24	0.239	1.25
h-layer*h-layer	0.001667	0.000673	2.48	0.029	1.25
T-bed*T-bed	-0.000333	0.000673	-0.50	0.629	1.25
T-printing*v-printing	0.001000	0.000777	1.29	0.223	1.00
T-printing*h-layer	-0.001750	0.000777	-2.25	0.044	1.00
T-printing*T-bed	-0.001250	0.000777	-1.61	0.134	1.00
v-printing*h-layer	0.000750	0.000777	0.96	0.354	1.00
v-printing*T-bed	0.001250	0.000777	1.61	0.134	1.00
h-layer*T-bed	-0.000500	0.000777	-0.64	0.532	1.00
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
0.0015546	76.71%	49.54%	0.00%		

Hình 3.11. Bảng hồi quy

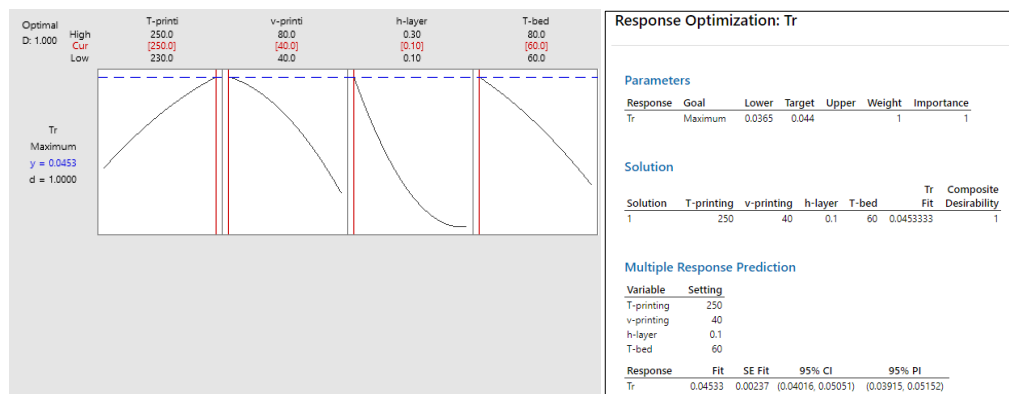
Bảng hồi quy cung cấp các hệ số của các tham số ảnh hưởng đến độ bền kéo (Tr) của mẫu PTEG. Dưới đây là phương trình hồi quy tổng quát mô tả mối quan hệ giữa các tham số:

$$\begin{aligned} \text{Tr} = & -0.357 + 0.00251 \text{ T-printing} - 0.001529 \text{ v-printing} + 0.356 \text{ h-layer} + 0.00317 \\ & \text{T-bed} - 0.000003 \text{ T-printing*T-printing} - 0.000002 \text{ v-printing*v-printing} + \\ & 0.1667 \text{ h-layer*h-layer} - 0.000003 \text{ T-bed*T-bed} + 0.000005 \text{ T-printing*v-} \\ & \text{printing} - 0.001750 \text{ T-printing*h-layer} - 0.000012 \text{ T-printing*T-bed} + \\ & 0.000375 \text{ v-printing*h-layer} + 0.000006 \text{ v-printing*T-bed} - 0.000500 \text{ h-} \\ & \text{layer*T-bed} \end{aligned}$$

- v-printing có hệ số hồi quy âm (-0.001133), cho thấy rằng khi tăng tốc độ in, độ bền kéo giảm. Giá trị P-value của tốc độ in là 0.012, cho thấy yếu tố này có ý nghĩa thống kê.
- h-layer có hệ số hồi quy âm (-0.001000) và giá trị P-value là 0.046, cho thấy độ dày lớp cũng có ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kéo.
- T-bed có hệ số hồi quy dương (+0.000159), nhưng P-value là 0.717, chỉ ra rằng yếu tố này không có ảnh hưởng lớn đến độ bền kéo.
- R-Sq = 76.71%: Cho thấy rằng 76.71% sự biến động của độ bền kéo có thể được giải thích bởi các tham số đầu vào.
- R-Sq(adj) = 49.54%: Mức độ hiệu chỉnh cho thấy mô hình có độ chính xác vừa phải.
- R-Sq(pred) = 0.00%: Điều này cho thấy khả năng dự đoán của mô hình không cao, có thể cần thêm dữ liệu để cải thiện.

e) Tìm giá trị tối ưu

Với việc tìm giá trị lớn nhất (Maximum) cho hàm mục tiêu là ứng suất kéo T_r , ta cần nhập giá trị mong muốn cho hàm mục tiêu (Target) và giá trị giới hạn dưới cho hàm mục tiêu (Lower) lần lượt là 0,044 và 0,0365. Cùng với trọng số (Weight) và hệ số mức độ quan trọng đều bằng 1, thì ta được kết quả như hai Hình 3.12 (a) và Hình 3.12 (b)



(a) Sơ đồ tối ưu

(b) Số liệu kết quả tối ưu

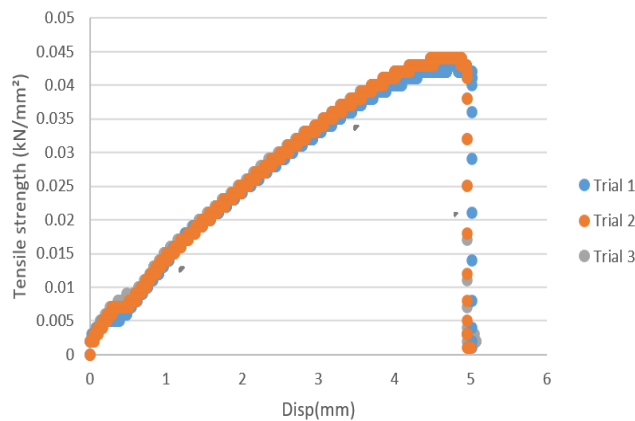
Hình 3.12. Response Optimization: T_r

Kết quả trên Hình 3.12 cho thấy, hàm mục tiêu Tr đạt được giá trị 0,0453 kN/mm²; cao hơn cả mức kỳ vọng (là 0.044); Hàm kỳ vọng (desirability function) đạt được bằng 1 (tức là đạt 100% kỳ vọng)

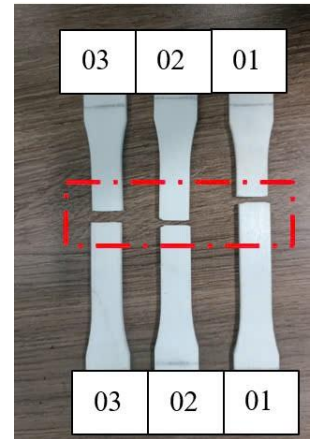
Vậy ta có kết quả tối ưu hoá quá trình in 3D với nhựa PETG với chỉ tiêu giới hạn bền kéo Tr dưới Bảng 3.7 sau:

Bảng 3.7. Thông số tối ưu hóa quá trình in 3D vật liệu PETG

T-printing (°C)	v-printing (mm/s)	h-layer (mm)	T-bed (°C)	Tr (kN/mm ²)
250	40	0.1	60	0.0453



(a) Biểu đồ Tensile strength



(b) 3 mẫu tối ưu

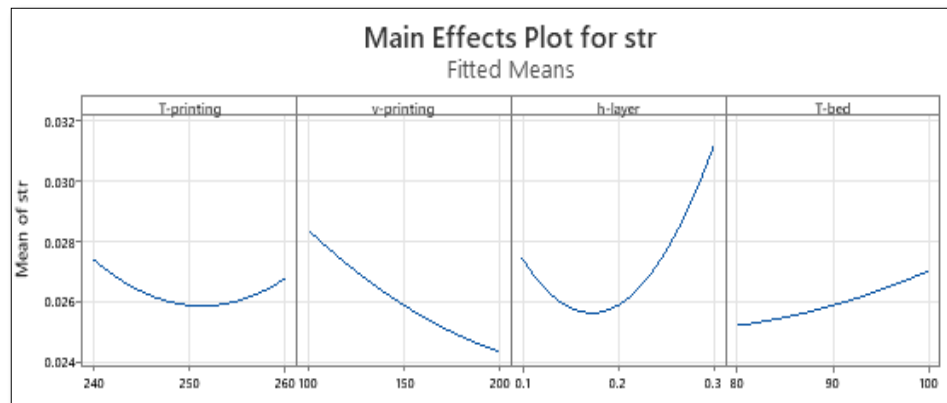
Hình 3.13. Kết quả thử nghiệm với mẫu thử tối ưu

Từ biểu đồ Hình 3.13 (a) ta thấy được sự tương đồng của 3 mẫu thử nghiệm. 3 mẫu tối ưu có Tensile strength lần lượt đạt: 0.044 kN/mm², 0.045 kN/mm², 0.045 kN/mm².

3.3.3. Vật liệu ABS

Dựa trên các biểu đồ và bảng số liệu từ thí nghiệm với vật liệu ABS, chúng ta có thể rút ra một số kết luận quan trọng về ảnh hưởng của các tham số in 3D đến độ bền kéo (Tr). Các tham số được phân tích bao gồm nhiệt độ đầu in (T-printing), tốc độ in (v-printing), độ dày lớp (h-layer), và nhiệt độ bàn in (T-bed).

a) Biểu đồ Main Effects Plot



Hình 3.14. Biểu đồ Main Effects Plot

Biểu đồ Main Effects Plot cho thấy tác động độc lập của từng tham số đến độ bền kéo của mẫu ABS:

- T-printing (Nhiệt độ đầu in): Đường cong biểu thị độ bền kéo giảm nhẹ và tăng khi nhiệt độ vượt ngưỡng 250°C.
- V-printing (Tốc độ in): Tốc độ in thấp (100 mm/s) giúp đạt được độ bền kéo cao hơn, trong khi tốc độ in cao hơn làm giảm độ bền.
- H-layer (Độ dày lớp): Độ dày lớp có ảnh hưởng lớn, khi tăng từ 0.1 mm lên 0.3 mm thì độ bền kéo tăng đáng kể.
- T-bed (Nhiệt độ bàn in): Không có sự khác biệt đáng kể khi thay đổi nhiệt độ bàn in từ 80°C đến 100°C. Điều này cho thấy nhiệt độ bàn in có thể giảm để tiết kiệm năng lượng mà không ảnh hưởng đến cơ tính.

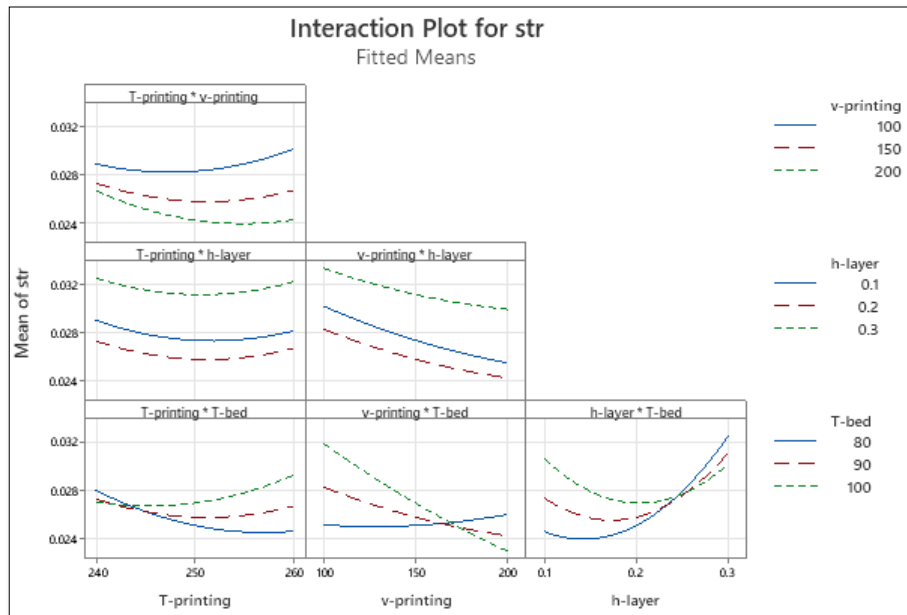
b) Biểu đồ Interaction Plot

Biểu đồ Interaction Plot cho thấy mức độ tương tác giữa các thông số in 3D đối với giá trị str. Nhìn chung, sự thay đổi không quá lớn khi xét trên tất cả các cặp thông số, tuy nhiên có một số điểm đáng chú ý:

- Độ dày lớp (h-layer) và tốc độ in (v-printing) có ảnh hưởng rõ rệt, khi tăng h-layer từ 0.1 lên 0.3 làm giá trị str thay đổi đáng kể, đặc biệt khi kết hợp với tốc độ in thấp.
- Tác động của nhiệt độ bàn in (T-bed) và nhiệt độ in (T-printing) tương đối nhỏ, chỉ gây dao động nhẹ.

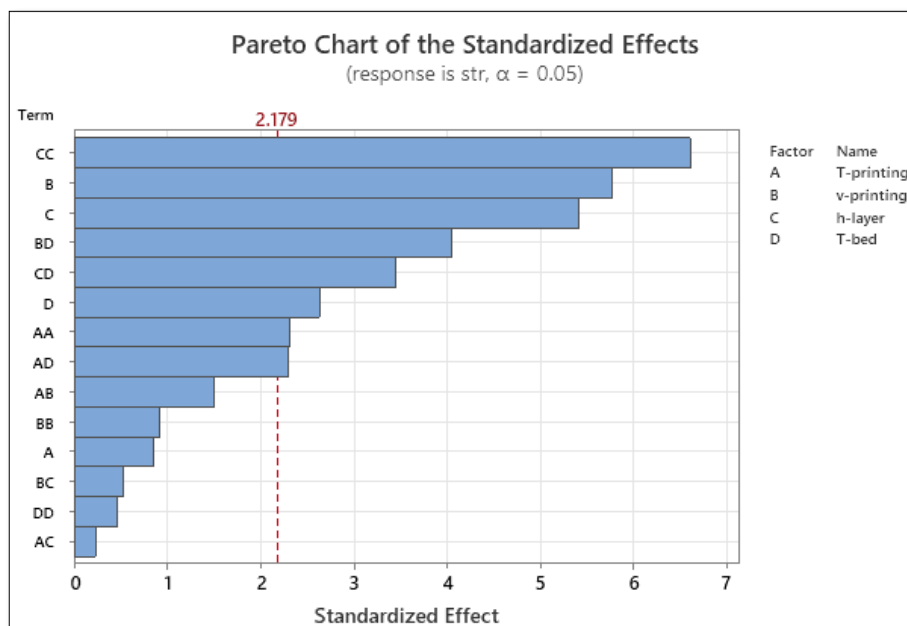
- Nhìn chung, các đường biểu diễn không giao nhau quá nhiều, cho thấy tương tác giữa hầu hết các thông số là yếu, ngoại trừ tương tác giữa h-layer và v-printing, đây có thể là yếu tố quan trọng cần tối ưu.

Nếu nhìn dưới góc độ tổng thể tương tác giữa các thông số không có quá nhiều sự thay đổi mạnh, ngoại trừ ở H-layer (độ dày lớp) và v-printing(tốc độ in).



Hình 3.15. Biểu đồ Interaction Plot

c) Biểu đồ Pareto



Hình 3.16. Biểu đồ Pareto

Biểu đồ Pareto cho thấy yếu tố nào có tác động mạnh nhất đến độ bền kéo:

- Độ dày lớp (H-layer) có ảnh hưởng lớn nhất (CC), theo sau là tốc độ in(v-printing).
- Các yếu tố như T-printing và T-bed có ảnh hưởng nhỏ hơn, cho thấy chúng không phải là yếu tố quyết định trong khoảng khảo sát này.

d) Bảng hồi quy (Coded Coefficients)

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.025852	0.000695	37.19	0.000	
T-printing	-0.000298	0.000348	-0.86	0.408	1.00
v-printing	-0.002004	0.000348	-5.77	0.000	1.00
h-layer	0.001880	0.000348	5.41	0.000	1.00
T-bed	0.000914	0.000348	2.63	0.022	1.00
T-printing*T-printing	0.001205	0.000521	2.31	0.039	1.25
v-printing*v-printing	0.000477	0.000521	0.92	0.378	1.25
h-layer*h-layer	0.003442	0.000521	6.60	0.000	1.25
T-bed*T-bed	0.000241	0.000521	0.46	0.652	1.25
T-printing*v-printing	-0.000903	0.000602	-1.50	0.159	1.00
T-printing*h-layer	0.000137	0.000602	0.23	0.824	1.00
T-printing*T-bed	0.001384	0.000602	2.30	0.040	1.00
v-printing*h-layer	0.000320	0.000602	0.53	0.605	1.00
v-printing*T-bed	-0.002433	0.000602	-4.04	0.002	1.00
h-layer*T-bed	-0.002073	0.000602	-3.44	0.005	1.00
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.0012041	92.80%	84.40%	75.26%	

Hình 3.17. Bảng hồi quy

Bảng hồi quy cung cấp các hệ số của các tham số ảnh hưởng đến độ bền kéo Str của mẫu ABS. Dưới đây là phương trình hồi quy tổng quát mô tả mối quan hệ giữa các tham số:

$$\begin{aligned} \text{Str} = & 0.967 - 0.00706 \text{ T-printing} + 0.000779 \text{ v-printing} + 0.024 \text{ h-layer} \\ & - 0.00266 \text{ T-bed} + 0.000012 \text{ T-printing*T-printing} + 0.000000 \text{ v-printing*v-printing} \\ & + 0.3442 \text{ h-layer*h-layer} + 0.000002 \text{ T-bed*T-bed} - 0.000002 \text{ T-printing*v-printing} \\ & + 0.000137 \text{ T-printing*h-layer} + 0.000014 \text{ T-} \end{aligned}$$

printing*T-bed + 0.000064 v-printing*h-layer - 0.000005 v-printing*T-bed
- 0.002073 h-layer*T-bed

- Hệ số hồi quy của h-layer và V-printing: có giá trị P-value < 0.05, độ dày lớp (h-layer) là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất và sau đó là V-printing mang ý nghĩa thống kê đáng kể đến độ bền kéo. Điều này khẳng định rằng việc điều chỉnh độ dày lớp và tốc độ in là một trong những cách hiệu quả để tối ưu hóa cơ tính của mẫu in.
- T-printing có hệ số hồi quy dương nhưng giá trị P-value > 0.05, cho thấy yếu tố này không ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kéo trong mô hình hiện tại. Do đó, các thông số này có thể được giảm xuống mức hợp lý nhằm tiết kiệm năng lượng mà không làm giảm đáng kể cơ tính.
- R-Sq = 92.80% sự biến thiên trong độ bền kéo được giải thích bởi mô hình hồi quy, cho thấy mức độ phù hợp của mô hình khá tốt.
- R-Sq(adj) = 84.40%: Mức giảm từ R-Sq xuống R-Sq(adj) (khoảng 8.40%) là chấp nhận được, cho thấy mô hình không bị quá nhiều tham số thừa, cho thấy rằng mô hình vẫn giữ được tính chính xác tương đối cao.
- R-Sq(pred) = 75.26%: đánh giá khả năng của mô hình khi áp dụng vào các dữ liệu mới không nằm trong tập dữ liệu thực nghiệm ban đầu. Giá trị 75.26% cho thấy rằng mô hình có khả năng dự đoán khá tốt.

3.4. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Trong chương này, chúng ta đã thực hiện phân tích và đánh giá ảnh hưởng của các tham số in 3D đến tính chất cơ học, cụ thể là độ bền kéo (Tr) của mẫu in bằng các vật liệu PLA, PETG, và ABS. Các kết quả phân tích từ biểu đồ Main Effects, Interaction Effects, Pareto Chart, và phương trình hồi quy đã cung cấp những thông tin quan trọng liên quan đến việc tối ưu hóa quá trình in 3D để cải thiện tính chất cơ học của sản phẩm.

- Qua phân tích xu hướng ảnh hưởng của các tham số lên độ bền của các mẫu vật liệu ta thấy rằng độ dày lớp (h-layer) có sự tương đồng giữa cả 3 loại vật liệu. Các chi tiết in sẽ có xu hướng giảm dần độ bền kéo khi độ dày lớp in tăng

dần từ 0.1mm đến 0.2mm, đổ chiều tăng khi độ dày lớp in tăng dần từ 0.2mm đến 0.3mm và có xu hướng tiếp tục tăng. Từ đó mở ra hướng tăng kích thước đầu đùn để tăng độ dày lớp in từ đó tăng cơ tính và giảm đáng kể thời gian sản xuất. Nhưng cũng cần cân đối với yếu tố thẩm mỹ và độ nhám bề mặt tăng.

- Độ dày lớp (h-layer) và tốc độ in (v-printing) là các yếu tố có ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kéo của mẫu in PEG và ABS, trong khi nhiệt độ bàn in T-bed có tác động không đáng kể đến cả 3 vật liệu, gợi ý khả năng giảm nhiệt độ bàn in để tiết kiệm năng lượng.
- Mặc dù các mô hình hồi quy cho thấy độ phù hợp khá tốt (R-Sq dao động từ 76% đến 92%), nhưng khả năng dự đoán (R-Sq(pred)) vẫn còn hạn chế cần thêm dữ liệu hoặc tham số để nâng cao tính chính xác. Chỉ có duy nhất phương trình hồi quy của vật liệu ABS đáp ứng được yêu cầu và có khả năng dự báo (R-Sq = 92.80%; R-Sq(adj) = 84.40%; R-Sq(pred) = 75.26%)

$$\begin{aligned} \text{Str(ABS)} = & 0.967 - 0.00706 \text{ T-printing} + 0.000779 \text{ v-printing} + 0.024 \text{ h-layer} \\ & - 0.00266 \text{ T-bed} + 0.000012 \text{ T-printing} * \text{T-printing} + 0.000000 \text{ v-} \\ & \text{printing} * \text{v-printing} + 0.3442 \text{ h-layer} * \text{h-layer} + 0.000002 \text{ T-bed} * \text{T-} \\ & \text{bed} - 0.000002 \text{ T-printing} * \text{v-printing} + 0.000137 \text{ T-printing} * \text{h-} \\ & \text{layer} + 0.000014 \text{ T-printing} * \text{T-bed} + 0.000064 \text{ v-printing} * \text{h-layer} \\ & - 0.000005 \text{ v-printing} * \text{T-bed} - 0.002073 \text{ h-layer} * \text{T-bed} \end{aligned}$$

KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA ĐỀ TÀI

❖ KẾT LUẬN CHUNG:

Nghiên cứu đã hoàn thành các mục tiêu đề ra, bao gồm khảo sát và phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ in 3D đến cơ tính của chi tiết in, đặc biệt với ba loại vật liệu phổ biến: PLA, PETG và ABS. Từ các thí nghiệm và xử lý số liệu, nghiên cứu đã làm sáng tỏ một số khía cạnh quan trọng:

- Ảnh hưởng của các thông số in: Các thông số như nhiệt độ đầu in (T-printing), tốc độ in (v-printing) và nhiệt độ bàn in (T-bed) có tác động không đồng nhất lên các đặc tính cơ học của mẫu in. Trong đó, độ dày lớp (h-layer) được xác định là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến độ bền kéo của cả ba loại vật liệu có xu hướng tương đồng trên cả 3 vật liệu. Độ bền kéo tăng khi độ dày lớp in tăng dần từ 0.2mm đến 0.3mm và có xu hướng tiếp tục tăng. Từ đó mở ra hướng tăng kích thước đầu đùn để tăng độ dày lớp in từ đó tăng cơ tính và giảm đáng kể thời gian sản xuất. Nhưng cũng cần cân đối với yếu tố thẩm mỹ và độ nhám bề mặt tăng.
- Tiết kiệm năng lượng: Nhiệt độ bàn in (T-bed) có ảnh hưởng nhỏ đến độ bền kéo, điều này mở ra cơ hội giảm nhiệt độ bàn in nhằm tiết kiệm năng lượng mà không làm giảm đáng kể chất lượng sản phẩm.
- Tìm ra được phương trình hồi quy của vật liệu ABS đáp ứng được yêu cầu và có khả năng dự báo ($R-Sq = 92.80\%$; $R-Sq(adj) = 84.40\%$; $R-Sq(pred) = 75.26\%$)

$$\begin{aligned} Str(ABS) = & 0.967 - 0.00706 \text{ T-printing} + 0.000779 \text{ v-printing} + 0.024 \text{ h-layer} \\ & - 0.00266 \text{ T-bed} + 0.000012 \text{ T-printing} * \text{T-printing} + 0.000000 \text{ v-} \\ & \text{printing} * \text{v-printing} + 0.3442 \text{ h-layer} * \text{h-layer} + 0.000002 \text{ T-bed} * \text{T-} \\ & \text{bed} - 0.000002 \text{ T-printing} * \text{v-printing} + 0.000137 \text{ T-printing} * \text{h-} \\ & \text{layer} + 0.000014 \text{ T-printing} * \text{T-bed} + 0.000064 \text{ v-printing} * \text{h-layer} \\ & - 0.000005 \text{ v-printing} * \text{T-bed} - 0.002073 \text{ h-layer} * \text{T-bed} \end{aligned}$$

Những kết quả trên không chỉ cung cấp dữ liệu thực nghiệm có giá trị mà còn góp phần củng cố nền tảng khoa học cho việc ứng dụng công nghệ in 3D trong sản xuất và thiết kế công nghiệp, đồng thời hướng đến các giải pháp bền vững và hiệu quả.

❖ HƯỚNG PHÁT TRIỂN ĐỀ TÀI:

Dựa trên kết quả nghiên cứu, đề tài có thể được phát triển theo các hướng sau:

Mở rộng phạm vi nghiên cứu trên các loại vật liệu khác: Ngoài các vật liệu phổ biến như PLA, PETG, và ABS, có thể mở rộng nghiên cứu sang các vật liệu composite, vật liệu sinh học, hoặc vật liệu có tính năng đặc biệt khác để kiểm tra tính chất cơ học khi thay đổi các tham số in 3D.

Nghiên cứu chi tiết hơn về năng lượng tiêu thụ: Đánh giá cụ thể lượng năng lượng tiêu thụ của máy in 3D đối với các mức nhiệt độ đầu in và nhiệt độ bàn in khác nhau. Đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu giảm phát thải carbon và hướng đến sản xuất xanh.

Phát triển công nghệ in 3D thế hệ mới: Tập trung vào cải tiến thiết bị, ví dụ như máy in sử dụng công nghệ đa vật liệu hoặc tích hợp hệ thống điều khiển thông minh. Khảo sát các phương pháp in 3D mới, như in bằng laser hoặc công nghệ SLA (Stereolithography), để so sánh và tích hợp với FDM.

Nâng cao độ chính xác của mô hình hồi quy và dự đoán: Đề tài hiện tại đã đạt được các kết quả cơ bản trong việc xây dựng và đánh giá mô hình hồi quy để phân tích ảnh hưởng của các thông số in 3D đến cơ tính. Tuy nhiên, để nâng cao độ chính xác và khả năng ứng dụng thực tế, cần mở rộng thêm dữ liệu thí nghiệm, áp dụng các phương pháp phân tích tiên tiến và kiểm nghiệm thực tế.

Ứng dụng trong các lĩnh vực công nghiệp cụ thể: Từ các kết quả nghiên cứu, có thể phát triển thêm các ứng dụng thực tế trong sản xuất các linh kiện kỹ thuật, sản phẩm y tế, hoặc mô hình kiến trúc sử dụng công nghệ in 3D, từ đó đưa ra các quy trình in tối ưu cho từng ứng dụng cụ thể.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. T. Dinh, N. Q. Tu, and N. D. Diep, "RESEARCH ON COMPUTATION, DESIGN, EXPERIMENTATION OF THE THIN PART MANUFACTURING PROCESS INTEGRATING 3D PRINTING AND ROLLING TECHNOLOGY," 2024.
- [2] G. V. Research, "3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software, Services), By Printer Type, By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030," <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>, Market Research Report October 2023 2023.
- [3] M. Intelligence, "3D Printing Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2024 - 2029)," <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/3d-printing-market>, 2023.
- [4] J. Kiendl and C. J. C. P. B. E. Gao, "Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layup," vol. 180, p. 107562, 2020.
- [5] J. Zubrzycki, E. Quirino, M. Staniszewski, M. J. A. i. S. Marchewka, and T. R. Journal, "Influence of 3D printing parameters by FDM method on the mechanical properties of manufactured parts," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, no. 5, 2022.
- [6] T. Yao, J. Ye, Z. Deng, K. Zhang, Y. Ma, and H. J. C. P. B. E. Ouyang, "Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses," vol. 188, p. 107894, 2020.
- [7] A. International, *Standard test method for tensile properties of plastics*. ASTM international, 2014.
- [8] T. A. Son, P. S. Minh, and T. Do Thanh, "Effect of 3D printing parameters on the tensile strength of products," in *Key Engineering Materials*, 2020, vol. 863, pp. 103-108: Trans Tech Publ.
- [9] H. N. Huynh, T. H. Bui, T. T. H. Thai, and H. T. J. K. E. M. Nguyen, "Research on the effect of technical attributes on the tensile strength of FDM products," vol. 863, pp. 33-50, 2020.
- [10] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. J. M. Mahapatra, and Design, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," vol. 31, no. 1, pp. 287-295, 2010.
- [11] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. J. M. Zhao, "Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS," vol. 8, no. 9, pp. 5834-5846, 2015.
- [12] B. H. Lee, J. Abdullah, and Z. A. J. J. o. m. p. t. Khan, "Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object," vol. 169, no. 1, pp. 54-61, 2005.

- [13] Q. Sun, G. Rizvi, C. Bellehumeur, and P. J. R. p. j. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," vol. 14, no. 2, pp. 72-80, 2008.
- [14] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. J. R. p. j. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," vol. 8, no. 4, pp. 248-257, 2002.
- [15] S. R. Rajpurohit and H. K. J. T. I. J. o. A. M. T. Dave, "Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer," vol. 101, pp. 1525-1536, 2019.
- [16] R. Srinivasan, T. Pridhar, L. Ramprasath, N. S. Charan, and W. J. M. t. p. Ruban, "Prediction of tensile strength in FDM printed ABS parts using response surface methodology (RSM)," vol. 27, pp. 1827-1832, 2020.
- [17] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. J. J. o. A. R. Mahapatra, "Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement," vol. 3, no. 1, pp. 81-90, 2012.
- [18] A. Bellini and S. J. R. P. J. Güçeri, "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling," vol. 9, no. 4, pp. 252-264, 2003.
- [19] K. Chin Ang, K. Fai Leong, C. Kai Chua, and M. J. R. P. J. Chandrasekaran, "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures," vol. 12, no. 2, pp. 100-105, 2006.
- [20] D.-Y. Chang and B.-H. J. T. I. J. o. A. M. T. Huang, "Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process," vol. 53, pp. 1027-1037, 2011.
- [21] D. Croccolo, M. De Agostinis, and G. J. C. M. S. Olmi, "Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30," vol. 79, pp. 506-518, 2013.
- [22] L. Magalhães, N. Volpato, M. J. J. o. t. B. S. o. M. S. Luersen, and Engineering, "Evaluation of stiffness and strength in fused deposition sandwich specimens," vol. 36, pp. 449-459, 2014.
- [23] O. S. Carneiro, A. Silva, R. J. M. Gomes, and Design, "Fused deposition modeling with polypropylene," vol. 83, pp. 768-776, 2015.
- [24] J. T. Cantrell *et al.*, "Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts," vol. 23, no. 4, pp. 811-824, 2017.
- [25] M. Arif, S. Kumar, K. Varadarajan, W. J. M. Cantwell, and Design, "Performance of biocompatible PEEK processed by fused deposition additive manufacturing," vol. 146, pp. 249-259, 2018.
- [26] A. W. Gebisa and H. G. J. M. Lemu, "Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment," vol. 11, no. 4, p. 500, 2018.

- [27] F. Rayegani and G. C. J. T. I. J. o. A. M. T. Onwubolu, "Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE)," vol. 73, pp. 509-519, 2014.
- [28] A. Qattawi, B. Alrawi, and A. J. P. M. Guzman, "Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach," vol. 10, pp. 791-803, 2017.
- [29] S. Panda, S. Padhee, S. Anoop Kumar, and S. J. d. o. i. Mahapatra, "Optimization of fused deposition modelling (FDM) process parameters using bacterial foraging technique. *Intell Inf Manag* 1: 89–97," vol. 4, 2009.
- [30] S. O. J. I. J. E. R. T. Akande, "Dimensional accuracy and surface finish optimization of fused deposition modelling parts using desirability function analysis," vol. 4, no. 4, pp. 196-202, 2015.
- [31] P. K. Gurralla, S. P. J. V. Regalla, and P. Prototyping, "Multi-objective optimisation of strength and volumetric shrinkage of FDM parts: a multi-objective optimization scheme is used to optimize the strength and volumetric shrinkage of FDM parts considering different process parameters," vol. 9, no. 2, pp. 127-138, 2014.
- [32] R. V. Rao, D. P. J. E. S. Rai, and a. I. J. Technology, "Optimization of fused deposition modeling process using teaching-learning-based optimization algorithm," vol. 19, no. 1, pp. 587-603, 2016.
- [33] M. J. P. Algarni, "The influence of raster angle and moisture content on the mechanical properties of PLA parts produced by fused deposition modeling," vol. 13, no. 2, p. 237, 2021.
- [34] S. Rajpurohit and H. Dave, "Impact strength of 3D printed PLA using open-source FFF-based 3D printer. *Prog Addit Manuf* 6: 119–131," ed, 2021.
- [35] H. Sukanto, D. Smaradhana, J. Triyono, and P. Wicaksono, "Investigating the effect of layer thickness on the product quality of pla manufactured by 3D printing technique," in *Proceedings of the 6th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials: ICE-SEAM 2019, 16–17 October 2019, Surakarta, Indonesia*, 2020, pp. 811-818: Springer.
- [36] B. Tymrak, M. Kreiger, J. M. J. M. Pearce, and Design, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions," vol. 58, pp. 242-246, 2014.
- [37] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, and M. J. R. P. J. Martorelli, "The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer," vol. 21, no. 5, pp. 604-617, 2015.
- [38] J. Torres, J. Coteló, J. Karl, and A. P. J. J. Gordon, "Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives," vol. 67, pp. 1183-1193, 2015.
- [39] H. Li, T. Wang, J. Sun, and Z. J. R. P. J. Yu, "The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties," vol. 24, no. 1, pp. 80-92, 2018.

- [40] J. Torres, M. Cole, A. Owji, Z. DeMastry, and A. P. J. R. P. J. Gordon, "An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments," vol. 22, no. 2, pp. 387-404, 2016.
- [41] X. Liu, M. Zhang, S. Li, L. Si, J. Peng, and Y. J. T. I. J. o. A. M. T. Hu, "Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method," vol. 89, pp. 2387-2397, 2017.
- [42] T. Abbas, F. M. Othman, and H. B. J. d. Ali, "Effect of infill Parameter on compression property in FDM Process," vol. 12, no. 7, pp. 25-4, 2017.
- [43] C. Abeykoon, P. Sri-Amphorn, A. J. I. J. o. L. M. Fernando, and Manufacture, "Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures," vol. 3, no. 3, pp. 284-297, 2020.
- [44] M. Galeja, A. Hejna, P. Kosmela, and A. J. M. Kulawik, "Static and dynamic mechanical properties of 3D printed ABS as a function of raster angle," vol. 13, no. 2, p. 297, 2020.
- [45] A. L. Alves Guimarães, V. Gerlin Neto, C. R. Foschini, M. dos Anjos Azambuja, and L. A. V. J. R. P. J. Hellmeister, "Influence of ABS print parameters on a 3D open-source, self-replicable printer," vol. 26, no. 10, pp. 1733-1738, 2020.
- [46] S. Dwiyati, A. Kholil, R. Riyadi, and S. Putra, "Influence of layer thickness and 3D printing direction on tensile properties of ABS material," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1402, no. 6, p. 066014: IOP Publishing.
- [47] J. P. Isaac, S. Dondeti, H. V. J. I. J. o. S. Tippur, and Structures, "Fracture behavior of additively printed ABS: Effects of print architecture and loading rate," vol. 212, pp. 80-95, 2021.
- [48] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, A. J. D. p. Conejero, and a. manufacturing, "Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing," vol. 3, no. 3, pp. 183-192, 2016.
- [49] K. L. Alvarez C, R. F. Lagos C, and M. J. I. e. I. Aizpun, "Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts," vol. 36, no. 3, pp. 110-116, 2016.
- [50] S. Teraiya, S. Vyavahare, and S. Kumar, "Experimental investigation on influence of process parameters on mechanical properties of PETG parts made by fused deposition modelling," in *Advances in Manufacturing Processes: Select Proceedings of RAM 2020*: Springer, 2020, pp. 283-293.
- [51] M.-H. Hsueh *et al.*, "Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling," vol. 13, no. 11, p. 1758, 2021.
- [52] A. International, *ISO/ASTM 52900: 2015 Additive Manufacturing-General Principles-Terminology* (ASTM F2792-10e1). West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015.

- [53] I. J. A. I. W. C. ASTM, PA, USA, "ASTM52921-13 Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies," 2013.
- [54] A. Dey, N. J. J. o. M. Yodo, and M. Processing, "A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics," vol. 3, no. 3, p. 64, 2019.
- [55] C. Lee, S. Kim, H. Kim, and S.-H. J. J. o. m. p. t. Ahn, "Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts," vol. 187, pp. 627-630, 2007.
- [56] S. Vyavahare, S. Teraiya, D. Panghal, and S. J. R. P. J. Kumar, "Fused deposition modelling: a review," vol. 26, no. 1, pp. 176-201, 2020.
- [57] A. Tsiolikas, T. Mikrou, F. Vakouftsi, K. Aslani, and J. Kechagias, "Robust design application for optimizing ABS fused filament fabrication process: A case study," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 564, no. 1, p. 012021: IOP Publishing.
- [58] H. Li, T. Wang, Z. J. A. i. M. S. Yu, and Engineering, "The quantitative research of interaction between key parameters and the effects on mechanical property in FDM," vol. 2017, no. 1, p. 9152954, 2017.
- [59] C. Pagano, V. Basile, F. Modica, and I. Fassi, "Micro-FDM process capability and post-processing effects on mechanical properties," in *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2139, no. 1: AIP Publishing.
- [60] M. Montero, S. Roundy, D. Odell, S.-H. Ahn, and P. K. J. S. o. M. E. Wright, "Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments," vol. 10, no. 13552540210441166, pp. 1-21, 2001.
- [61] V. Basile, F. Modica, G. Fontana, S. Ruggeri, and I. J. J. o. M.-a. N.-M. Fassi, "Improvements in accuracy of fused deposition modeling via integration of low-cost on-board vision systems," vol. 8, no. 1, p. 010905, 2020.
- [62] S. Balli, "Process Simulation of Additive Manufacturing for Polymers," ed, 2024.
- [63] P. Wang, B. Zou, H. Xiao, S. Ding, and C. J. J. o. M. P. T. Huang, "Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK," vol. 271, pp. 62-74, 2019.
- [64] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, P. J. J. M. Núñez, and Design, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection," vol. 124, pp. 143-157, 2017.
- [65] A. A. Ahmed, L. J. F. Susmel, f. o. e. materials, and structures, "A material length scale-based methodology to assess static strength of notched additively manufactured polylactide (PLA)," vol. 41, no. 10, pp. 2071-2098, 2018.
- [66] X. Zhang, L. Chen, T. Mulholland, and T. A. J. P. f. A. T. Osswald, "Effects of raster angle on the mechanical properties of PLA and Al/PLA composite part produced by fused deposition modeling," vol. 30, no. 8, pp. 2122-2135, 2019.

- [67] E. E. Cho, H. H. Hein, Z. Lynn, S. J. Hla, and T. J. J. E. S. R. Tran, "Investigation on influence of infill pattern and layer thickness on mechanical strength of PLA material in 3D printing technology," vol. 3, no. 2, pp. 27-37, 2019.
- [68] O. Luzanin, D. Movrin, V. Stathopoulos, P. Pandis, T. Radusin, and V. J. R. P. J. Guduric, "Impact of processing parameters on tensile strength, in-process crystallinity and mesostructure in FDM-fabricated PLA specimens," vol. 25, no. 8, pp. 1398-1410, 2019.
- [69] Y. Zhao, Y. Chen, Y. J. M. Zhou, and Design, "Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses," vol. 181, p. 108089, 2019.
- [70] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, and A. M. J. M. Camacho, "The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis," vol. 11, no. 8, p. 1333, 2018.
- [71] M. Rismalia, S. Hidajat, I. Permana, B. Hadisujoto, M. Muslimin, and F. Triawan, "Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1402, no. 4, p. 044041: IOP Publishing.
- [72] A.-D. Mazurchevici, R.-I. Popa, C. Carausu, S.-N. Mazurchevici, and D. Nedelcu, "Influence of layer thickness, infill rate and orientation on thermal and structural loading of FDM parts," in *Advances in Manufacturing Processes: Select Proceedings of RAM 2020*: Springer, 2020, pp. 263-282.
- [73] M. R. Chandravadia and M. Chudasama, "Experimental Investigation on Tensile Properties of Nylon Glass Fibre Material Made Using Fused Deposition Modelling Process," in *Advances in Manufacturing Processes: Select Proceedings of RAM 2020*: Springer, 2020, pp. 329-342.
- [74] R. Murugan, R. Mitilesh, and S. J. I. J. M. M. T. Singamneni, "Influence of process parameters on the mechanical behaviour and processing time of 3D printing," vol. 1, pp. 21-27, 2019.
- [75] H. K. Dave *et al.*, "Compressive strength of PLA based scaffolds: effect of layer height, infill density and print speed," vol. 11, no. 1, pp. 21-27, 2019.
- [76] J. M. Mercado-Colmenero, M. D. La Rubia, E. Mata-Garcia, M. Rodriguez-Santiago, and C. J. P. Martin-Doñate, "Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of petg polymers manufactured with fdm technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications," vol. 12, no. 10, p. 2202, 2020.
- [77] S. L. Messimer, T. Rocha Pereira, A. E. Patterson, M. Lubna, F. O. J. J. o. M. Drozda, and M. Processing, "Full-density fused deposition modeling dimensional error as a function of raster angle and build orientation: Large dataset for eleven materials," vol. 3, no. 1, p. 6, 2019.
- [78] G. Dolzyk, S. J. J. o. F. A. Jung, and Prevention, "Tensile and fatigue analysis of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol," vol. 19, pp. 511-518, 2019.

- [79] K. Durgashyam, M. I. Reddy, A. Balakrishna, and K. J. M. T. P. Satyanarayana, "Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method," vol. 18, pp. 2052-2059, 2019.
- [80] R. Srinivasan, P. Prathap, A. Raj, S. A. Kannan, and V. J. M. T. P. Deepak, "Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of PETG parts," vol. 27, pp. 1877-1883, 2020.
- [81] R. Srinivasan, W. Ruban, A. Deepanraj, R. Bhuvanesh, and T. J. M. T. P. Bhuvanesh, "Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling," vol. 27, pp. 1838-1842, 2020.
- [82] M. A. Kumar, M. Khan, and S. J. M. T. P. Mishra, "Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics," vol. 27, pp. 975-983, 2020.
- [83] A. Fatimatuzahraa, B. Farahaina, and W. Yusoff, "The effect of employing different raster orientations on the mechanical properties and microstructure of Fused Deposition Modeling parts," in *2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA)*, 2011, pp. 22-27: IEEE.
- [84] C. Ziemian, M. Sharma, and S. J. M. e. Ziemian, "Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling," vol. 23, pp. 159-180, 2012.
- [85] S. Ziemian, M. Okwara, and C. W. J. R. P. J. Ziemian, "Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene," vol. 21, no. 3, pp. 270-278, 2015.
- [86] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. J. J. o. F. A. Letcher, and Prevention, "Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation," vol. 16, pp. 467-481, 2016.
- [87] J. Nomani, D. Wilson, M. Paulino, and M. I. J. M. T. C. Mohammed, "Effect of layer thickness and cross-section geometry on the tensile and compression properties of 3D printed ABS," vol. 22, p. 100626, 2020.
- [88] S. N. S. W. Suaidi, M. A. Azizul, S. Sulaiman, T. Y. J. J. o. I. Hao, Engineering, and Innovation, "Effect of fused deposition modelling process parameters on the quality of ABS product," vol. 2, no. 1, pp. 9-9, 2020.
- [89] L. Baich, G. Manogharan, and H. J. I. J. o. R. M. Marie, "Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts," vol. 5, no. 3-4, pp. 308-319, 2015.
- [90] D. Yadav, D. Chhabra, R. K. Garg, A. Ahlawat, and A. J. M. T. P. Phogat, "Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network," vol. 21, pp. 1583-1591, 2020.
- [91] M. Samykano, S. Selvamani, K. Kadirgama, W. Ngui, G. Kanagaraj, and K. J. T. I. J. o. A. M. T. Sudhakar, "Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters," vol. 102, pp. 2779-2796, 2019.

- [92] A. Abbott, G. Tandon, R. Bradford, H. Koerner, and J. J. A. M. Baur, "Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication," vol. 19, pp. 29-38, 2018.
- [93] M. Domingo-Espin, J. A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa, and J. J. M. Lluma-Fuentes, "Fatigue performance of ABS specimens obtained by fused filament fabrication," vol. 11, no. 12, p. 2521, 2018.