

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF 3D PRINTED GEARS**Nguyen Von Dim***TNU - University of Information and Communication Technology*

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	03/5/2025	This paper presents the results of an experimental investigation into the strength limits and operational performance of gears fabricated by three-dimensional (3D) printing. The study focuses on a comparative evaluation of noise emission, transmission efficiency, and backlash in spur, helical, and herringbone gear geometries; the influence of gear module and printing density on mechanical strength; and identification of the optimal 3D-printing materials (PLA, ABS, PETG, ASA) via destructive strength testing. Results indicate that herringbone gears achieve the best compromise between operational smoothness and load-bearing capacity. Mechanical strength increases markedly when both module size and infill density reach or exceed 30 percent. Among the materials tested, PLA and ASA exhibit the highest failure loads. This research provides valuable guidance for selecting gear type, material, and printing parameters to optimize 3D-printed gear drives, thereby expanding the application potential of additive manufacturing in power-transmission systems.
Revised:	20/8/2025	
Published:	20/8/2025	
KEYWORDS		
Spur		
Helical		
Herringbone		
3D printed gears		
3D printing material		

KHẢO SÁT THỰC NGHIỆM BÁNH RĂNG CHẾ TẠO BẰNG CÔNG NGHỆ IN 3D**Nguyễn Văn Dim***Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên*

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	03/5/2025	Bài báo này trình bày kết quả của nghiên cứu thực nghiệm về giới hạn bền và hiệu suất của bánh răng được chế tạo bằng công nghệ in 3D. Nghiên cứu tập trung vào việc so sánh hiệu suất (độ ồn, hiệu suất truyền động, độ ro) của bánh răng trụ, bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V; khảo sát ảnh hưởng của module bánh răng và mật độ in đến độ bền cơ học; và xác định vật liệu in 3D phù hợp nhất (PLA, ABS, PETG, ASA) thông qua các thử nghiệm độ bền tới giới hạn phá hủy. Kết quả cho thấy bánh răng chữ V có sự cân bằng tốt nhất về hiệu suất và độ bền. Độ bền của bánh răng tăng lên khi module và mật độ in tăng $\geq 30\%$. PLA và ASA là những vật liệu cho thấy độ bền cao nhất. Nghiên cứu này cung cấp những thông tin giá trị cho việc lựa chọn loại bánh răng, vật liệu và thông số in 3D tối ưu cho các ứng dụng truyền động bằng bánh răng, mở rộng tiềm năng ứng dụng của công nghệ in 3D.
Ngày hoàn thiện:	20/8/2025	
Ngày đăng:	20/8/2025	
TỪ KHÓA		
Bánh răng trụ		
Bánh răng nghiêng		
Bánh răng chữ V		
Bánh răng in 3D		
Vật liệu in 3D		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12714>*Email: nvdim@ictu.edu.vn*<http://jst.tnu.edu.vn>

1. Giới thiệu

Bánh răng là một bộ phận cơ khí quan trọng, được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực công nghiệp khác nhau, từ hệ thống truyền động đơn giản đến các cơ cấu phức tạp. Với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ in 3D, việc chế tạo bánh răng bằng phương pháp này đã trở nên khả thi, mang lại nhiều ưu điểm như khả năng tạo hình linh hoạt, thời gian sản xuất nhanh và chi phí có thể tối ưu hóa cho các ứng dụng đặc biệt hoặc sản xuất số lượng nhỏ. Các nghiên cứu trước đây đã tập trung vào khả năng in 3D các loại bánh răng khác nhau và bước đầu đánh giá hiệu suất của chúng. Boral và cộng sự [1] mô tả các phương pháp thiết kế và chế tạo bánh răng trụ và bánh răng nghiêng truyền thống, tạo nền tảng lý thuyết cho nghiên cứu và chế tạo bằng in 3D. Bryła và cộng sự [2] đã phân tích mòn của bánh răng trụ và bánh răng chữ V được chế tạo bằng in 3D sử dụng vật liệu PET-G thông qua phương pháp thống kê và thị giác máy, cho thấy bánh răng in 3D có khả năng ứng dụng trong truyền động cơ khí. Tunalioglu và cộng sự [3] nghiên cứu khả năng chống mài mòn của bánh răng trụ nhựa được sản xuất bằng phương pháp in 3D FDM. Nghiên cứu chỉ ra những ưu điểm của bánh răng nhựa và lợi thế của in 3D so với các phương pháp sản xuất truyền thống (ép phun, phay định hình răng) trong việc giảm chi phí khuôn và chất thải. Các thử nghiệm mài mòn trên thiết bị FZG với các vật liệu PLA, ABS và PETG cho thấy rằng PETG có khả năng chống mài mòn tốt nhất trong điều kiện thử nghiệm. Muminović và cộng sự [4] phân tích thực nghiệm phá hủy bánh răng trụ được chế tạo bằng in 3D nhựa PLA; kết quả cho thấy tuổi thọ của bánh răng làm từ PLA tăng lên đáng kể khi phần trăm thể tích điền đầy tăng. Kopar và cộng sự [5] nghiên cứu về ảnh hưởng của góc raster trong in 3D đến các tính chất cơ học của vật liệu PLA, PETG và ABS. Nghiên cứu đã đánh giá độ bền kéo, khả năng hấp thụ năng lượng, độ bền nén và độ bền uốn của các vật liệu này ở các góc raster khác nhau. Kết quả cho thấy góc raster có ảnh hưởng đáng kể đến các tính chất cơ học. Sedlak và cộng sự [6] nghiên cứu về ảnh hưởng của các yếu tố môi trường (UV, nhiệt độ cao, độ ẩm cao, chu kỳ nhiệt, thời tiết) đến các tính chất cơ học (độ bền kéo, độ cứng) của các vật liệu in 3D phổ biến (PLA, PETG, ABS, ASA) được chế tạo bằng phương pháp FFF. Gần đây, Bezzini và cộng sự [7] nghiên cứu và đánh giá các hộp giảm tốc được chế tạo bằng in 3D nhựa PLA ứng dụng trong robotics. Các mẫu được đánh giá dựa trên các tiêu chí quan trọng như trọng lượng, chi phí, khả năng dẫn động ngược, ma sát, độ đều của tỷ số truyền, độ rơ bánh răng và độ cứng. Kết quả cho thấy các hộp giảm tốc in 3D được phát triển là những lựa chọn thay thế có giá trị cho việc truyền động các khớp robot. Basak và cộng sự [8] sử dụng kỹ thuật in 3D BMD để chế tạo bánh răng thép không gỉ PH 17-4 với hai chiều cao lớp khác nhau và tiến hành gia công sau in trên một số mẫu. Các bánh răng in được so sánh với bánh răng thương mại về độ mài mòn, độ ồn và nhiệt độ vận hành. Kết quả cho thấy bánh răng in với chiều cao lớp 50 μm có hiệu suất tốt nhất. Buj-Corral và cộng sự [9] so sánh độ chính xác kích thước và sai số hình dạng của bánh răng trụ in 3D được làm từ PLA và Nylon-PA6 bằng công nghệ FFF. Pujari và cộng sự [10] nghiên cứu tổng quan toàn diện về bánh răng trụ in 3D, tập trung vào các khía cạnh quan trọng như thiết kế, lựa chọn vật liệu, quy trình sản xuất và đánh giá độ bền tiếp xúc; xem xét các phương pháp phân tích và thực nghiệm để đánh giá các đặc tính cơ học của bánh răng in 3D. Nội dung nghiên cứu cũng tổng quan về các kỹ thuật in 3D phù hợp và nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tối ưu hóa thiết kế.

Như đã được tổng hợp ở trên, có nhiều công trình nghiên cứu thực nghiệm, phân tích độc lập về vật liệu in 3D và các loại bánh răng. Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại những khoảng trống kiến thức quan trọng cần được làm rõ. Thứ nhất, sự so sánh về hiệu suất (độ bền, hiệu suất truyền động, độ rơ) giữa các loại bánh răng trụ, bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V khi được chế tạo bằng in 3D vẫn còn hạn chế. Trong môi trường sản xuất truyền thống, đặc tính chế tạo khác biệt đáng kể giữa các loại bánh răng này, nhưng trong in 3D, sự khác biệt này có thể được giảm thiểu, mở ra những cân nhắc mới về lựa chọn loại bánh răng phù hợp. Thứ hai, ảnh hưởng của các thông số in 3D như module bánh răng, mật độ in (infill) và vật liệu in đến độ bền cơ học của bánh răng in 3D vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống. Việc hiểu rõ mối quan hệ này là cần thiết để tối ưu hóa thiết kế và lựa chọn vật liệu cho bánh răng in 3D trong các ứng dụng thực tế. Bài báo này tập

trung vào việc giải quyết những khoảng trống nêu trên thông qua một nghiên cứu thực nghiệm. Mục đích chính của nghiên cứu là:

- So sánh hiệu suất (độ ồn, hiệu suất truyền động, độ rơ) của bánh răng trụ, bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V được chế tạo bằng in 3D nhựa.
- Khảo sát ảnh hưởng của module bánh răng và mật độ in đến giới hạn bền của bánh răng in 3D.
- Xác định loại vật liệu in 3D phù hợp nhất (PLA, ABS, PETG, ASA) cho ứng dụng bánh răng dựa trên các thí nghiệm giới hạn bền.

Kết quả của nghiên cứu này sẽ cung cấp những thông tin giá trị cho các nhà thiết kế và kỹ sư trong việc lựa chọn loại bánh răng, vật liệu và thông số in 3D tối ưu cho các ứng dụng cụ thể, từ đó mở rộng tiềm năng ứng dụng của công nghệ in 3D.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện theo phương pháp thực nghiệm, tập trung vào việc chế tạo và thử nghiệm các mẫu bánh răng in 3D với các biến số khác nhau.

2.1. Thiết bị và công cụ

2.1.1. Máy in 3D

Máy in 3D Anycubic Kossel Plus được sử dụng để chế tạo tất cả các mẫu bánh răng. Máy in này có khả năng in với độ chính xác cao và tốc độ nhanh, đảm bảo chất lượng và tính nhất quán của các mẫu in. Các thông số kỹ thuật chính của máy in 3D được thể hiện trên Hình 1.



(a)

Tên máy	Anycubic Kossel Plus
Kích thước bàn in	$\phi 230 \times 300 \text{ mm}$
Công nghệ in	FDM (Fused Decomposition Modeling)
Độ phân giải layer	$0,1 \text{ mm} - 0,4 \text{ mm}$
Tốc độ in	$20 - 60 \text{ mm/s}$
Độ chính xác các trục	$X/Y \ 0,0125 \text{ mm}, Z \ 0,0025 \text{ mm}$
Vật liệu tương thích	PLA, ABS, HIPS, Wood

(b)

Hình 1. Máy in 3D: (a) Kết cấu máy và (b) thông số kỹ thuật [11]

2.1.2. Vật liệu in 3D

Bốn loại vật liệu in 3D phổ biến và có tiềm năng ứng dụng trong cơ khí được lựa chọn để thử nghiệm: PLA, ABS, PETG, ASA. Các đặc tính vật liệu và khả năng in khác nhau được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Đặc tính vật liệu và thông số khả năng in 3D [12]

	ABS	PLA	PETG	ASA
Độ bền kéo (Mpa)	40	65	53	55
Hệ số giãn nở nhiệt ($\mu\text{m/m/}^{\circ}\text{C}$)	90	68	60	98
Khối lượng riêng (g/cm^3)	1,04	1,24	1,23	1,07
Khả năng in	8/10	9/10	9/10	7/10
Nhiệt độ in ($^{\circ}\text{C}$)	220 - 250	190 - 220	230 - 250	235 - 255
Nhiệt độ bàn in ($^{\circ}\text{C}$)	95 - 110	45 - 60	75 - 90	90 - 110
Bàn gia nhiệt	Có	Có hoặc không	Có	Có

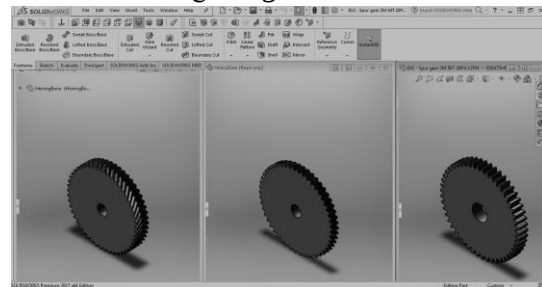
2.1.3. Công cụ thiết kế bánh răng

Công cụ được sử dụng để thiết kế các bánh răng là SOLIDWORKS Toolbox Library của phần mềm Solidworks 2017 như được minh họa trên Hình 2. Các bánh răng được thiết kế với module

lần lượt 1,0; 1,25; 1,5; 2,0 và 2,5, số răng điều chỉnh tương ứng để giữ khoảng cách tâm 50 mm, chiều dày bánh răng 12 mm, góc áp lực 20° như được liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số các loại bánh răng

Module (mm)	Số răng	
	Bánh răng trụ	Bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V
1,0	50	47
1,25	40	38
1,5	33	31
2,0	25	23
2,5	20	19



Hình 2. Bánh răng chữ V, bánh răng nghiêng, bánh răng trụ được thiết kế trên SolidWorks

2.1.4. Công cụ thiết lập thông số in 3D

Phần mềm Simplify3D được sử dụng để thiết lập và cài đặt các thông số của quá trình in 3D các bánh răng như thể hiện trong Bảng 3. Simplify3D được chọn do khả năng cung cấp giao diện người dùng trực quan, hỗ trợ tùy chỉnh chi tiết các thông số in, đồng thời tối ưu hóa thời gian in và chất lượng sản phẩm. Phần mềm này là một trong các phần mềm thương mại được sử dụng trong các nghiên cứu liên quan đến in 3D, đặc biệt trong chế tạo các chi tiết cơ khí như bánh răng [10].

Trong đó, thử nghiệm với các mật độ in khác nhau (30%, 45%, 100%) cho một module 2,5 mm để đánh giá ảnh hưởng của mật độ in. Lý do chọn ba mức mật độ in này là để đại diện cho các trường hợp: mật độ thấp (30%) nhằm giảm trọng lượng và thời gian in, mật độ trung bình (45%) cân bằng giữa độ bền và hiệu quả chế tạo, và mật độ tối đa (100%) đảm bảo độ bền cao nhất. Module 2,5 mm được chọn vì đây là giá trị lớn nhất trong các module được thiết kế (Bảng 2), cho phép đánh giá độ bền cơ học ở kích thước răng lớn, ảnh hưởng của mật độ in được thể hiện rõ rệt hơn so với các module nhỏ hơn.

Bảng 3. Thông số cấu hình in 3D

Vật liệu	Nhiệt độ in (°C)	Nhiệt độ bàn in (°C)	Chiều dày lớp in (mm)	Tốc độ in (mm/s)
PLA	200	50	0,2	55
ABS	230	100	0,2	55
PETG	240	80	0,2	55
ASA	240	100	0,2	55

2.1.5. Thiết bị đo

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Dải độ ồn (dB)	30 ~ 130	Dải đo (mm)	0 - 12,7
Độ chính xác (dB)	± 1,5	Độ chính xác (mm)	± 0,03
Độ phân giải (dB)	0,1	Độ phân giải (mm)	0,01
Tần số	31,5 Hz ~ 8 kHz	Đường kính trục (mm)	Ø9,5



Hình 3. Thiết bị đo độ ồn và thông số kỹ thuật máy đo độ ồn



Hình 4. Thiết bị đo độ rơ và thông số kỹ thuật

Thiết bị đo độ ồn UNI-T UT353BT được sử dụng để đo mức độ tiếng ồn phát ra trong quá trình vận hành của các loại bánh răng. Các thông số kỹ thuật chính của thiết bị được thể hiện trong Hình

3. UNI-T UT353BT được hiệu chuẩn trước thí nghiệm bằng nguồn âm thanh chuẩn (94 dB, 1 kHz) theo hướng dẫn của nhà sản xuất [13], đảm bảo độ tin cậy của phép đo [14]. Thiết bị đo độ rơ bằng đồng hồ so điện tử SYNTEK với các thông số kỹ thuật như được thể hiện trong Hình 4.

Thiết bị đo lực kéo SHAHE được sử dụng để tác dụng lực lên bánh răng và đo lực tại thời điểm bánh răng bị phá hủy, từ đó xác định độ bền cơ học. Các thông số kỹ thuật của thiết bị đo được thể hiện trong Hình 5.



Thông số	Giá trị
Giá trị tải lớn nhất (N)	500
Độ chính xác (mm)	$\pm 1\%$
Độ phân giải (N)	0,1
Khối lượng tịnh (kg)	0,4

Hình 5. Đồng hồ đo lực kéo và thông số kỹ thuật

2.2. Thiết lập thí nghiệm

2.2.1. Thí nghiệm đo độ rơ của cặp bánh răng

Thử nghiệm đo độ rơ cặp bánh răng ăn khớp, sơ đồ thí nghiệm được thiết lập như trên Hình 6. Bánh răng 1 được gắn cố định bằng 4 bu lông-đai ốc và bánh răng 2 có thể quay tự do quanh trục nhờ bạc đạn gắn vào lỗ trục bánh răng. Các bánh răng đều có cùng module và đều được in 3D với cùng thông số như trong Bảng 2. Phương pháp đo bao gồm cố định một bánh răng và đo chuyển vị góc của bánh răng còn lại khi tác dụng một lực nhỏ. Đo độ rơ bằng đồng hồ so tại điểm cách tâm 10 cm.

2.2.2. Thí nghiệm đo độ ồn và hiệu suất truyền động



Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm đo độ rơ của cặp bánh răng

Thực hiện thí nghiệm đo độ ồn và hiệu suất truyền động bằng cách lắp một cặp bánh răng ăn khớp với nhau. Trong đó, bánh răng dẫn động gắn với động cơ bước, bánh răng này sẽ truyền chuyển động cho một bánh răng khác cùng số răng và cùng module. Thực hiện ghi lại độ ồn và điện năng tiêu thụ. Điện áp cấp cho động cơ sẽ giữ nguyên cho tất cả các loại bánh răng, do đó có thể theo dõi công suất tiêu thụ cần thiết để vận hành cơ cấu bánh răng, từ đó đánh giá hiệu suất truyền động. Số thí nghiệm thực hiện tương ứng với ba loại bánh răng trụ, bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V với các thông số lần lượt như thể hiện trong Bảng 2. Sơ đồ thí nghiệm được thiết lập như trong Hình 7.

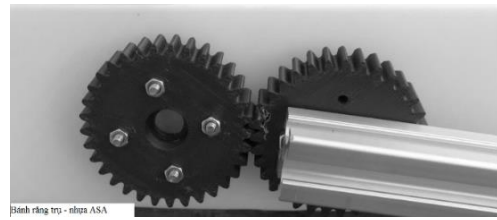
2.2.3. Thí nghiệm khảo sát giới hạn bền bánh răng

Thực hiện thí nghiệm khảo sát giới hạn bền bánh răng bằng cách sử dụng cặp bánh răng 1-2 ăn khớp với nhau. Trong đó, bánh răng 1 được gắn cố định với giá thông qua 4 bu lông – đai ốc, bánh răng 2 gắn với thanh đòn và tác dụng lực tới điểm bánh răng bị phá hủy. Đồng hồ đo lực được gắn với tay đòn ở khoảng cách 20 cm và xác định giá trị lực mà tại đó bánh răng bị gãy. Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện như Hình 8.



Hình 7. Sơ đồ thí nghiệm đo độ ồn và điện năng tiêu thụ

Thí nghiệm này sẽ trả lời ba câu hỏi: 1. Loại bánh răng in 3D nào có giới hạn bền lớn nhất? 2. Module bánh răng in 3D nào có giới hạn bền lớn nhất? 3. Vật liệu in 3D nào có giới hạn bền lớn nhất để chế tạo bánh răng?



Hình 8. Kiểm tra giới hạn bền của cặp bánh răng

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Độ rơ của cặp bánh răng in 3D

Đầu tiên, tiến hành kiểm tra độ rơ (backlash)– tức là khoảng hở hoặc độ lỏng giữa hai bánh răng thẳng ăn khớp với nhau. Thực nghiệm đo độ rơ của hai bánh răng trụ ăn khớp dựa theo tiêu chuẩn ISO TR 10064-2:1996 [15]. Kết quả cho thấy tổng độ rơ theo cả hai chiều vào khoảng 2,6 mm tại khoảng cách 10 cm. Tiếp theo, kiểm tra bánh răng nghiêng cho kết quả tốt hơn, với tổng độ rơ theo cả hai chiều vào khoảng 1,6 mm tại cùng khoảng cách 10 cm. Đối với bánh răng chữ V, tổng độ rơ theo cả hai chiều là khoảng 1,9 mm tại 10 cm. Kết quả được tổng hợp trong Bảng 4.

Bảng 4. Độ rơ của cặp bánh răng in 3D

Loại bánh răng	Độ rơ (mm)
Bánh răng thẳng	2,6
Bánh răng nghiêng	1,6
Bánh răng chữ V	1,9

Như vậy, kết quả thu được từ thực nghiệm: bánh răng thẳng có độ rơ lớn hơn so với bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V. Độ rơ đo được là phù hợp với độ chính xác chế tạo của phương pháp in 3D FDM, vì thực tế sai số kích thước và sai số hình dáng của phương pháp in 3D lên đến 0,3 mm [9]. Kết quả này đã trả lời được câu hỏi của mục đích nghiên cứu đặt ra về hiệu suất truyền động liên quan đến tiêu chí độ rơ của ba loại bánh răng trụ răng thẳng, bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V. Độ rơ bánh răng có ảnh hưởng quan trọng đến động lực học của bánh răng [16]. Độ rơ quá lớn có thể gây ra tiếng ồn và rung động, trong khi độ rơ quá nhỏ có thể dẫn đến mài mòn nhanh chóng và kẹt răng.

3.2. Độ ồn và hiệu suất của cặp bánh răng in 3D

Bảng 5. Độ ồn và hiệu suất của cặp bánh răng in 3D

Loại bánh răng	Độ ồn (dB)	Mức tiêu thụ điện (W)
Bánh răng thẳng	78,2	5,7
Bánh răng nghiêng	76,5	5,9
Bánh răng chữ V	75,3	6,3

Đầu tiên, thực nghiệm cặp bánh răng thẳng với máy đo độ ồn cho kết quả khoảng 78,2 dB, và mức tiêu thụ điện dao động từ 5,4 W đến 5,7 W. Tiếp theo, thực nghiệm cặp bánh răng nghiêng cho kết quả mức độ ồn khoảng 76,5 dB, và mức tiêu thụ điện từ 5,7 W đến 5,9 W. Cuối cùng, cặp bánh răng chữ V có mức độ ồn khoảng 75,3 dB và mức tiêu thụ điện từ 5,5 W đến 6,3 W. Kết quả được tổng hợp trong Bảng 5.

Từ kết quả thực nghiệm này, thấy rằng bánh răng thẳng tạo ra mức độ tiếng ồn cao nhất nhưng có hiệu suất truyền động tốt nhất (tiêu thụ điện năng thấp nhất). Bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V hoạt động êm ái hơn nhưng tiêu thụ điện năng cao hơn một chút, cho thấy hiệu suất thấp hơn. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Mohammad và cộng sự đã công bố trước đây [17]. Trong nghiên cứu của họ, hiệu suất của bánh răng thẳng in 3D được làm từ ba loại vật liệu polylactic acid (PLA) khác nhau: PLA tái chế (rPLA), PLA pha trộn và PLA nguyên chất (vPLA) phụ thuộc vào một số đặc tính kỹ thuật, bao gồm khả năng chống mài mòn, tải trọng vận hành, tốc độ và nhiệt độ hoạt động. Để đánh giá các yếu tố này, độ ồn, nhiệt độ, mức độ mài mòn, tỷ lệ mài mòn và tuổi thọ sử dụng được đo bằng một máy thử nghiệm tự chế tạo ở các tốc độ quay.

Trong đó, ở tốc độ 500 vòng/phút, rPLA cho thấy mức độ tiếng ồn tăng đáng kể từ mức ban đầu 82,1 dB. Độ ồn của bánh răng chủ yếu bắt nguồn từ quá trình khớp răng giữa các răng bánh răng, tương tác giữa trượt và lăn trong chuyển động quay dưới tải trọng [8], [18], [19]. Diện tích tiếp xúc lớn hơn giúp phân bổ lực đều hơn, giảm áp lực tại điểm tiếp xúc, từ đó giảm rung động và tiếng ồn. Diện tích tiếp xúc lớn hơn có thể tăng ma sát, làm giảm hiệu suất truyền động.

3.3. Giới hạn bền bánh răng in 3D

3.3.1. Giới hạn bền theo loại bánh răng

Kết quả thu được từ thí nghiệm khảo sát giới hạn bền bánh răng: Bánh răng thẳng gãy ở lực 192 N, tương ứng mô-men xoắn 38,4 Nm. Bánh răng nghiêng gãy ở lực 210 N, tương ứng mô-men xoắn 42,6 Nm, còn bánh răng chữ V gãy ở lực 149 N (29,8 Nm). Qua thí nghiệm này, thấy rằng nên hạn chế dùng bánh răng thẳng, nên dùng bánh răng chữ V khi truyền động có tải lớn, và nếu dùng bánh răng nghiêng thì phải sử dụng ổ bi chịu lực dọc trục.

3.3.2. Giới hạn bền theo module bánh răng

Module của bánh răng xác định kích thước của răng và đường kính bánh răng. Kết quả thí nghiệm đối với các bánh răng chữ V được in 3D với cùng thông số, năm module khác nhau, từ 1,0 đến 2,5 mm như thể hiện trong Bảng 6.

Bảng 6. Giới hạn bền bánh răng in 3D

Thông số in 3D	Module bánh răng chữ V (mm)	Lực phá hủy (N)	Mô men xoắn (Nm)
Chiều dày lớp in: 0,2 mm; tốc độ in: 55 mm/s; mật độ in (infill): 30%; nhựa in 3D: PLA	1	101	20,2
	1,25	129	25,8
	1,5	110	22,0
	2	151	30,2
	2,5	124	24,8

Từ kết quả thí nghiệm thấy rằng có mối tương quan tỉ lệ thuận giữa kích thước module và khả năng chịu tải. Bánh răng với module lớn hơn có tiết diện chân răng lớn hơn, dẫn đến khả năng chống lại lực uốn tốt hơn. Ngoài ra, tỉ lệ mật độ in (infill) có ảnh hưởng đáng kể đến tính toàn vẹn cấu trúc bánh răng. Thử nghiệm với module 2,5 cho thấy giá trị mật độ in tối ưu nên $\geq 35\%$, tốt nhất ở 100%, tuy nhiên thời gian in lâu hơn.

3.3.3. Giới hạn bền theo vật liệu in 3D

Để xác định vật liệu nào có giới hạn bền cao nhất cho bánh răng in 3D. Trong thí nghiệm này, sử dụng các bánh răng thẳng có module 1,5 như thể hiện trong Bảng 2. Kết quả thí nghiệm như sau: Bánh răng nhựa PLA gãy khi đạt lực 119 N, tương đương mô-men 23,8 Nm. Bánh răng nhựa ABS gãy ở khoảng 92 N, nhưng quá trình gãy diễn ra từ từ hơn so với PLA, vì nhựa ABS có khả năng biến dạng, chịu uốn trước khi đứt hẳn. Bánh răng nhựa ASA gãy ở lực 122 N, tương đương mô-men 24,4 Nm. Nhựa ASA cho thấy độ bền tương đương PLA, thậm chí cao hơn 3 N, đồng thời vẫn có độ dẻo trước khi gãy như nhựa ABS. Bánh răng nhựa PETG gãy ở lực 89 N, và cũng có một chút biến dạng trước khi phá hủy.

Kết quả thử nghiệm khớp với bảng đặc tính vật liệu của hãng Simplify3D [12] và của hãng Stratasys [20]: bánh răng nhựa PLA có giới hạn bền cao nhất và độ cứng lớn nhất; bánh răng nhựa ASA có giới hạn bền tương đương nhựa PLA nhưng độ cứng thấp hơn, gần giống nhựa ABS.

4. Kết luận

Khảo sát thực nghiệm này đã làm sáng tỏ về giới hạn bền vật liệu nhựa in 3D và hiệu suất của bánh răng in 3D, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của ba loại bánh răng, module, mật độ in và vật liệu in 3D. Các kết luận chính rút ra được từ thực nghiệm là:

• Bánh răng chữ V cho thấy sự cân bằng tốt nhất về hiệu suất và độ bền trong các thử nghiệm. Bánh răng thẳng cho hiệu suất truyền động tốt nhất, bánh răng nghiêng và bánh răng chữ V vận hành êm hơn, có độ bền răng cao nhất trong ba loại bánh răng.

- Module bánh răng lớn hơn và mật độ in cao 100% giúp tăng độ bền của bánh răng in 3D.
- Nhựa PLA và ASA là những vật liệu in 3D cho các ứng dụng bánh răng đòi hỏi độ bền cao.

Các định hướng nghiên cứu và phát triển tiếp theo:

- Xây dựng quy hoạch thực nghiệm (DOE) nghiên cứu sâu hơn về ảnh hưởng của các thông số in 3D đến độ bền và độ chính xác của bánh răng.
- Thực hiện các thử nghiệm độ bền và khả năng chịu mài mòn của bánh răng in 3D trong các điều kiện vận hành thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] P. Boral, R. Gołębski, and K. Ruzena, "Technological aspects of manufacturing and control of gears," *Materials*, vol. 16, no. 23, 2023, Art. no. 7453.
- [2] J. Bryła, A. Martowicz, M. Petko, K. Gac, K. Kobus, and A. Kowalski, "Wear analysis of 3D-printed spur and herringbone gears used in automated retail kiosks based on computer vision and statistical methods," *Materials*, vol. 16, no. 16, 2023, Art. no. 5554.
- [3] M. S. Tunalıoglu and B. V. Agca, "Wear and service life of 3-D printed polymeric gears," *Polymers*, vol. 14, no. 10, 2022, Art. no. 2064.
- [4] A. J. Muminović, S. Braut, Ž. Božić, N. Pervan, and A. Skoblar, "Experimental failure analysis of polylactic acid gears made by additive manufacturing," *Procedia Structural Integrity*, vol. 46, pp. 125-130, 2023.
- [5] M. Kopar and A. R. Yildiz, "Experimental investigation of mechanical properties of PLA, ABS, and PETG 3-d printing materials using fused deposition modeling technique," *Materials Testing*, vol. 65, no. 12, pp. 1795-1804, 2023.
- [6] J. Sedlak, Z. Joska, J. Jansky, J. Zouhar, S. Kolomy, M. Slany, A. Svasta, and J. Jirousek, "Analysis of the mechanical properties of 3D-printed plastic samples subjected to selected degradation effects," *Materials*, vol. 16, no. 8, 2023, Art. no. 3268.
- [7] R. Bezzini, G. Bassani, C. A. Avizzano, and A. Filippeschi, "Design and Experimental Evaluation of Multiple 3D-Printed Reduction Gearboxes for Wearable Exoskeletons," *Robotics*, vol. 13, no. 11, 2024, Art. no. 168.
- [8] A. K. Basak, J. Ghassebi, and A. Pramanik, "Performance of Gears Manufactured Through Additive Manufacturing," *Metals*, vol. 15, no. 1, pp. 2075-4701, 2025.
- [9] I. Buj-Corral and E. E. Zayas-Figueras, "Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon," *Polymer Testing*, vol. 117, 2023, Art. no. 107862.
- [10] L. Pujari, S. Manoj, O. K. Gaddikeri, P. Shetty, and M. B. Khot, "Recent advancements in 3D printing for gear design and analysis: A comprehensive review," *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, vol. 7, no. 6, pp. 4979-5003, 2024.
- [11] J. Ouyang, "Anycubic," 2015. [Online]. Available: <https://store.anycubic.com/products/anycubic-kossel-3d-printer>. [Accessed April 22, 2025].
- [12] C. Webster, "Simplify3D", [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>. [Accessed April 22, 2025].
- [13] H. Shaojun, "UT353BT Mini Digital Sound Level Meter User Manual," 2022 [Online]. Available: <https://meters.uni-trend.com/product/ut353-ut353bt/#Docs>. [Accessed April 22, 2025].
- [14] I. E. Commission, "IEC 61672-1:2013 - Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications," Geneva, Switzerland: IEC, 2013. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5708>. [Accessed April 22, 2025].
- [15] International ISO, ISO/TR 10064-2:1996, "Cylindrical gears - code of inspection practice - Part 2: Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash," ISO, 1996.
- [16] Q. Chen, Y. Ma, S. Huang, and H. Zhai, "Research on gears' dynamic performance influenced by gear backlash based on fractal theory," *Applied Surface Science*, vol. 313, pp. 325-332, 2014.
- [17] M. R. Hasan, I. J. Davies, A. Pramanik, M. John, and W. K. Biswas, "Technical assessment of 3D-printed spur gears produced from recycled PLA," *Curtin University*, 2024, doi: 10.21203/rs.3.rs-5284212/v1,
- [18] B. Polanec, S. Glodež, and A. Belšak, "Noise evaluation of coated polymer gears," *Polymers*, vol. 15, no. 3, 2023, Art. no. 783.
- [19] T. J. Hoskins, K. D. Dearn, S. N. Kukureka, and D. Walton, "Acoustic noise from polymer gears—A tribological investigation," *Materials & Design*, vol. 32, no. 6, pp. 3509-3515, 2011.
- [20] Y. Zeif, "Stratasys", [Online]. Available: <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/fdm-materials/>. [Accessed April 22, 2025].