

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÁY PHAY CNC TÍCH HỢP IN 3D FDM PHỤC VỤ CHẾ TẠO MẪU NHANH

RESEARCH ON DEVELOPING A CNC MILLING MACHINE INTEGRATED WITH
FDM 3D PRINTING FOR RAPID PROTOTYPING

Vũ Huy Hoàng, Nguyễn Xuân Hiếu, Vũ Thị Thu Trang*

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: trangvtt.vck@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quy trình nghiên cứu, thiết kế và chế tạo hệ thống máy phay CNC tích hợp công nghệ in 3D FDM nhằm tối ưu hóa không gian và chi phí cho các hoạt động đào tạo và chế tạo mẫu nhanh. Nghiên cứu tập trung vào việc tính toán động lực học để xác định công suất động cơ trục chính, lựa chọn hệ thống truyền động vít me bi và ray dẫn hướng nhằm đảm bảo độ chính xác chuyển động. Cấu trúc khung máy được phân tích ứng suất và độ biến dạng bằng phần mềm SAP2000 để đảm bảo tính ổn định dưới tải trọng thực tế. Điểm tích hợp của nghiên cứu là việc phát triển hệ thống điều khiển kép kết hợp giữa board Mach3 cho CNC và Arduino Uno R3 chạy firmware Marlin cho in 3D, cho phép chuyển đổi linh hoạt giữa hai chức năng gia công cắt gọt và sản xuất bồi đắp trên cùng một thiết bị. Kết quả thử nghiệm cho thấy máy hoạt động ổn định, tạo ra sản phẩm mẫu đạt yêu cầu về độ chính xác, khẳng định khả năng ứng dụng cao trong lĩnh vực nghiên cứu khoa học và sản xuất.

Từ khóa: Máy phay CNC; In 3D FDM; Chế tạo mẫu nhanh; Mach3; Arduino.

ABSTRACT

This paper presents the research, design, and fabrication of a CNC milling machine integrated with FDM 3D printing technology to optimize space and investment costs for educational and rapid prototyping purposes. The study focuses on dynamic calculations to determine spindle motor power and the selection of ball screw drive systems and guide rails to ensure motion precision. The machine frame structure's stress and deformation are analyzed using SAP2000 software to ensure stability under actual working loads. The highlight of this research is the development of a dual control system combining a Mach3 board for CNC functions and an Arduino Uno R3 with Marlin firmware for 3D printing, enabling flexible switching between subtractive and additive manufacturing technologies on a single device. Experimental results demonstrate stable operation and high quality prototypes, confirming the system's potential for scientific research and production.

Keywords: CNC milling; FDM 3D printing; Rapid prototyping; Mach3; Arduino.



1. MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 đang diễn ra mạnh mẽ, nhu cầu về công nghệ chế tạo mẫu nhanh đóng vai trò then chốt trong việc rút ngắn chu kỳ phát triển sản phẩm và tối ưu hóa quy trình sản xuất [1]. Hiện nay, hai phương pháp chế tạo phổ biến nhất là sản xuất bồi đắp thông qua công nghệ in 3D FDM và sản xuất bằng phương pháp gia công cắt gọt trên máy CNC [2, 3]. Tuy nhiên, các dòng máy trên thị trường thường chỉ tập trung vào một chức năng đơn nhất, điều này đòi hỏi người sử dụng phải đầu tư nhiều thiết bị riêng biệt, gây tốn kém chi phí đầu tư ban đầu cũng như chiếm dụng diện tích vận hành đáng kể [4].

Việc tích hợp cả hai chức năng gia công CNC và in 3D trên cùng một hệ thống thiết bị không chỉ là một giải pháp tiết kiệm không gian và nguồn lực mà còn mở ra khả năng chế tạo các chi tiết phức tạp bằng cách kết hợp ưu điểm về độ chính xác bề mặt của CNC với khả năng tạo hình tự do của in 3D [5]. Xuất phát từ thực tiễn đó, nghiên cứu này tập trung vào việc thiết kế và chế tạo máy phay CNC tích hợp đầu in 3D FDM với kích thước tổng thể dự kiến là $660 \times 660 \times 1650$ mm. Để đảm bảo tính ổn định và độ cứng vững trong quá trình vận hành đồng thời cả hai chế độ, kết cấu khung máy được lựa chọn theo dạng khung từ các thanh nhôm định hình chuyên dụng.

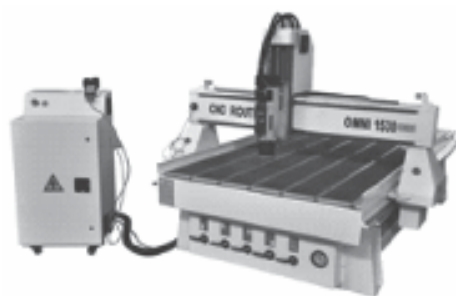
Nội dung nghiên cứu trình bày chi tiết quy trình tính toán động lực học để xác định lực cắt và công suất động cơ trục chính làm cơ sở lựa chọn động cơ phù hợp, đồng thời sử dụng phần mềm SAP2000 để phân tích ứng suất và độ biến dạng của kết cấu dưới tác động của tải trọng thực tế. Bên cạnh đó, hệ thống truyền động được tối ưu hóa thông qua việc tính chọn vít me bi và ray dẫn hướng nhằm đảm bảo độ chính xác chuyển động và giảm thiểu mài mòn.

Điểm nổi bật của nghiên cứu là việc phát triển hệ thống điều khiển kép, sử dụng board Mach3 cho chức năng CNC kết hợp với board Arduino Uno R3 nhúng firmware Marlin cho chức năng in 3D, cho phép chuyển đổi linh hoạt giữa hai công nghệ trên cùng một thiết bị phục vụ hiệu quả cho mục đích giáo dục và nghiên cứu khoa học.

2. TÍNH TOÁN THIẾT KẾ

2.1. Lựa chọn phương án thiết kế

Máy được thiết kế với mục tiêu tích hợp hai chức năng gia công CNC và in 3D FDM trên cùng một hệ thống, với kích thước tổng thể dự kiến ($660 \times 660 \times 1650$) mm. Để đáp ứng yêu cầu về độ cứng vững cũng như tính ổn định trong quá trình vận hành, kết cấu khung của máy được lựa chọn theo dạng khung chữ R, được chế tạo từ các thanh nhôm định hình ở Hình 1.



Hình 1. Máy CNC dạng Router

Sau khi đánh giá các phương án bố trí kết cấu, mô hình cấu trúc tổng thể của máy được xây dựng và thể hiện qua sơ đồ khối. Hệ thống chuyển động của máy gồm ba trục vuông góc với nhau, mỗi trục được truyền động riêng biệt và điều khiển độc lập bằng động cơ bước.

2.2. Tính toán chọn động cơ trục chính

Để đảm bảo khả năng gia công của máy, việc tính chọn động cơ trục chính được thực

hiện dựa trên quá trình xác định lực cắt và công suất cần thiết trong khi gia công. Từ các thông số công nghệ và điều kiện làm việc của dụng cụ cắt, lực cắt được tính toán làm cơ sở xác định công suất động cơ trục chính và lựa chọn spindle phù hợp. Các kết quả này đồng thời được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho quá trình phân tích kết cấu nhằm kiểm tra ứng suất và độ chuyển vị của khung máy dưới tác dụng của tải trọng làm việc.

Lực cắt trong quá trình gia công được xác định theo công thức:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot k_{mv} = 455N \quad (1)$$

Trong đó:

C_p, x, y, u, q, w : Các hệ số mũ;

D : Đường kính dao phay (mm);

B : Bề rộng phay (mm);

S : Lượng chạy dao (mm/răng);

z : Số răng;

n : Số vòng quay của dao (vg/ph).

Tốc độ cắt:

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot k_v = 73 \text{ m/ph} \quad (2)$$

Trong đó:

C_v, q, x, y, u, p : Hệ số và các số mũ;

T : Chu kỳ bền của dao (phút);

k_v : Hệ số điều chỉnh chung cho tốc độ cắt.

Dựa trên lực cắt giới hạn và vận tốc cắt trong quá trình gia công, công suất yêu cầu của động cơ trục chính N_e được xác định bằng:

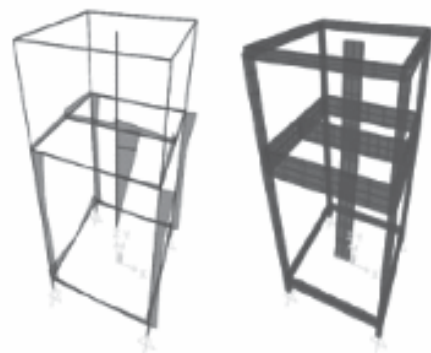
$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{1020.60} = 0,65 \text{ kW} \quad (3)$$

Thông thường công suất cắt chiếm khoảng (70 ~ 80%) công suất của động cơ. Một cách gần đúng, ta có công suất của động cơ ~ 0,8 kW. Trên cơ sở các kết quả tính toán và điều kiện thiết bị sẵn có, công suất động cơ trục chính được lựa chọn là Model GDZ-80-2.2B với công suất 1,5 kW. Các thông số tính toán được tổng hợp và trình bày trong bảng 1.

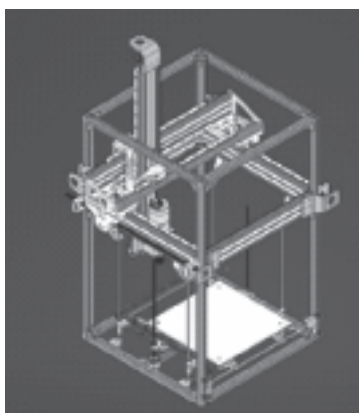
Bảng 1. Kết quả tính toán

Thông số	Giá trị
Đường kính dao (D)	7 (mm)
Số vòng quay (n)	24000 (vg/ph)
Tốc độ cắt (v)	73 (m/ph)
Chiều sâu cắt (t)	4 (mm)
Công suất spindle (N_e)	0,65 (kW)
Lực cắt (P_z)	455N

Để đánh giá độ bền và độ cứng vững của kết cấu, các giá trị tải trọng thu được từ quá trình tính toán được đưa vào mô hình phân tích bằng phần mềm SAP2000. Thông qua quá trình mô phỏng, phân bố ứng suất và độ chuyển vị của khung máy được xác định và trình bày trong Hình 2. Từ các kết quả này có thể đánh giá khả năng làm việc của kết cấu dưới điều kiện tải trọng thực tế. Trên cơ sở đó, mô hình CAD tổng thể của máy được hoàn thiện và thể hiện như trong Hình 3.



Hình 2. Kết quả ứng suất và biến dạng của kết cấu sau khi tính toán bằng SAP2000.



Hình 3. Mô hình hóa kết cấu máy bằng Inventor.

2.3. Tính toán, lựa chọn vít me

Trong máy CNC, vít me bi được lựa chọn cho cơ cấu truyền động các trục do có hiệu suất truyền động cao, ma sát nhỏ và độ chính xác chuyển động tốt. Nhờ đó, hệ thống đảm bảo độ cứng vững, giảm mài mòn và nâng cao độ ổn định trong quá trình gia công [1].

Bảng 2. Các thông số đầu vào tính toán, chọn vít me

Trục	Z	Y	X
Khối lượng m (kg)	15	35	20
Vận tốc chạy lớn nhất khi không gia công V_1 (m/ph)	18	18	18
Vận tốc chạy lớn nhất khi gia công V_2 (m/ph)	5	5	5
Gia tốc hoạt động lớn nhất a (m/s ²)	5	5	5
Thời gian hoạt động L_m (h)	10000	10000	10000
Hệ số ma sát bề mặt μ	0,1	0,1	0,1

Sau khi tính toán bước vít, lực dọc trục trung bình, tốc độ quay trung bình tải trọng, và bán kính trục dựa vào các thông số đầu vào, ta có bảng kết quả:

Bảng 3. Kết quả tính chọn vít me bi

Trục	Z	Y	X
Bước vít me l (kg)	10	10	10
Lực dọc trục trung bình F_m (N)	311	376	365
Tốc độ quay trung bình N_m (vg/ph)	890	890	890
Tải trọng tĩnh C_0 (N)	846	1026	996
Tải trọng động C_a (N)	3028	3661	3554

Trên cơ sở các kết quả tính toán tổng hợp tại Bảng 3, loại vít me bi HANSA SHIR1510C7 được lựa chọn nhằm đáp ứng các điều kiện thiết kế của hệ truyền động.

2.4. Tính toán, lựa chọn ổ lăn

Tính chọn ổ lăn cho trục Z tương tự cho cụm trục X, Y, xét lực dọc trục tác dụng lên các ổ lăn:

Lực dọc trục trung bình: $F_m = 311\text{N}$.

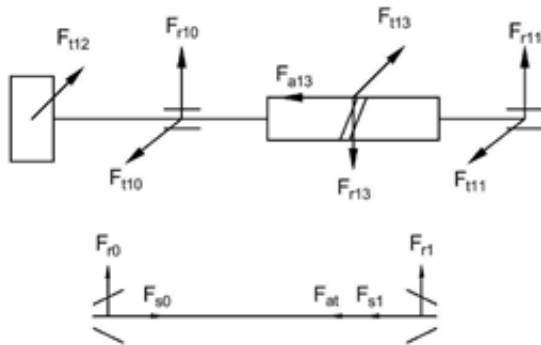
Lực tác dụng gây bởi khối lượng khi không chuyển động lên các ổ:

$$F_R = R_A = -R_B = \frac{mg}{2} = 75\text{N}$$

Dựa vào đường kính trục vít me và tốc độ quay của động cơ. Chọn ổ lăn mã 7202BE. Nội lực dọc trục tác dụng lên các ổ bi:

$$F_{si} = e.R_i = 1,14.75 = 85,5\text{N} \quad (4)$$

Lực dọc trục tác dụng lên các ổ bi:



Với ổ A:

$$\Sigma \overline{F_{aA}} = \overline{F_{sA}} + \frac{\overline{F_{ma}}}{2} = 85,5 + \frac{311}{2} = 241N \geq F_{sA}$$

Suy ra: $F_{aA} = 241N$.

Với ổ B:

$$\Sigma \overline{F_{aB}} = \overline{F_{sB}} + \frac{\overline{F_{ma}}}{2} = -85,5 + \frac{311}{2} = 70N < F_{sB}$$

Suy ra: $F_{aB} = 85,5N$.

Vậy $F_a = \max(F_{aA}, F_{aB}) = 241N$.

Kiểm tra:

$$\frac{F_{amax}}{v \cdot F_{rB}} = \frac{241}{1,75} = 3,21 > e \quad (5)$$

Xác định tải trọng quy ước:

Tải động:

$$Q = (X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a) \cdot k_d \cdot k_t = 224,41N \quad (6)$$

Tải tĩnh:

$$Q_0 = (X_0 \cdot V \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a) \cdot k_d \cdot k_t = 139,8N \quad (7)$$

Với: F_r, F_a là tải trọng hướng tâm và dọc trục (kN);

V là hệ số kể đến vòng nào quay;

k_t là hệ số kể đến ảnh hưởng của nhiệt độ;

k_d là hệ số kể đến đặc tính tải trọng;

X là hệ số tải trọng hướng tâm;

Y là hệ số tải trọng dọc trục.

Từ tải trọng vừa tính, kiểm tra khả năng tải tĩnh và tải động của ổ lăn:

$$C_0 = Q_0 \cdot L^{1/m} = 1434,3N < C_{or} = 4,4kN \quad (8)$$

$$C_d = Q \cdot L^{1/m} = 2302,4N < C = 8,32kN \quad (9)$$

Trong đó:

m là bậc của đường cong mỗi khi thử về ổ lăn;

L là tuổi thọ của ổ lăn (triệu vòng quay);

Q là tải trọng động quy ước (kN);

Q_0 là tải trọng tĩnh quy ước (kN).

Như vậy, ổ bi 7202BE phù hợp khả năng tải.

2.5. Tính chọn động cơ dẫn hướng

Tính chọn động cơ cho trục Z, tương tự cho cụm trục X, Y.

- Momen ma sát:

$$M_{fric} = \frac{m \cdot g \cdot \mu \cdot h \cdot \cos \alpha}{2\pi \cdot i \cdot \eta} = 0,04 Nm \quad (10)$$

Trong đó:

α là góc nghiêng trục động cơ;

i là tỷ số truyền;

η là hiệu suất động cơ;

h là bước của vít me (m).

- Momen chống trọng lực kết cấu:

$$M_W = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha}{2\pi \cdot i \cdot \eta} = 0 Nm \quad (11)$$

- Momen máy:

$$M_{mach} = \frac{h \cdot F_{amax}}{2\pi \cdot i \cdot \eta} = 0,88 Nm \quad (12)$$

☞

- Momen tĩnh:

$$M_{\text{stat}} = M_{\text{fric}} + M_w + M_{\text{mach}} = 0,92 \text{ Nm} \quad (13)$$

- Tốc độ quay động cơ:

$$N_{\text{noml}} = \frac{v_{\text{max}} \cdot i}{h} = 1800 \text{ vòng/phút} \quad (14)$$

Chọn động cơ: 60EB128LC-58DA.

2.6. Tính chọn động cơ bàn in

- Công suất động cơ:

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta} = 4,78 \text{ W} \quad (15)$$

Với: v là tốc độ lớn nhất của trục Z' ; η là hiệu suất của trục Z' .

- Tốc độ vòng quay trục Z' :

$$N_v = \frac{v_{\text{max}} \cdot i}{h} = 20 \text{ vg/s} = 1200 \text{ vg/ph} \quad (16)$$

Với i là tỷ số truyền và h là bước vít me.

Chọn động cơ: 57J1880EC-1000-LS-31(F).

2.7. Tính chọn bộ truyền dây đai

- Modul m xác định bởi công thức:

$$m = 35 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_1}{n_1}} = 0,6 \quad (24)$$

Trong đó: P_1 là công suất trên bánh đai chủ động (kW); n_1 là số vòng quay của bánh đai chủ động (vòng/phút).

Với $m = 1$, chọn chiều rộng đai $b = 6 \text{ mm}$.

Chọn bước đai $p = \pi \cdot m = 3,14 \text{ mm}$.

Chọn số răng: $z_1 = 60$ răng. Theo pulley thực tế.

Đường kính vòng chia các bánh đai:

$$d_1 = m \cdot z_1 = 60 \text{ mm}.$$

Chiều dài dây đai (tính gần đúng):

$$l = a_1 + a_2 + a_3 + \frac{\pi \cdot (d_1 + d_2 + d_3)}{2} + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4a_1} + \frac{(d_3 - d_2)^2}{4a_2} + \frac{(d_3 - d_1)^2}{4a_3}$$

Lực vòng riêng trên đai phải thỏa mãn điều kiện:

$$q = F_t \cdot K_d / b + q_m \cdot v^2 \leq [q] \quad (25)$$

Trong đó: F_t là lực vòng (N); q_m là khối lượng 1m đai có chiều rộng 1mm; K_d là hệ số tải trọng động; v là vận tốc vòng (m/s).

Thay số vào (25), ta được:

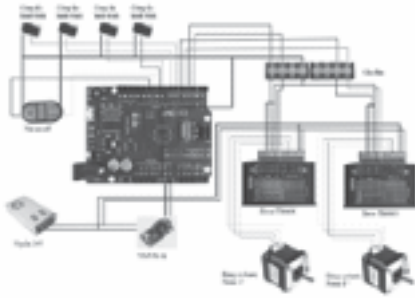
$$q = 13 \text{ N/m} \leq [q]$$

Vậy bộ truyền đai an toàn về điều kiện lực vòng riêng.

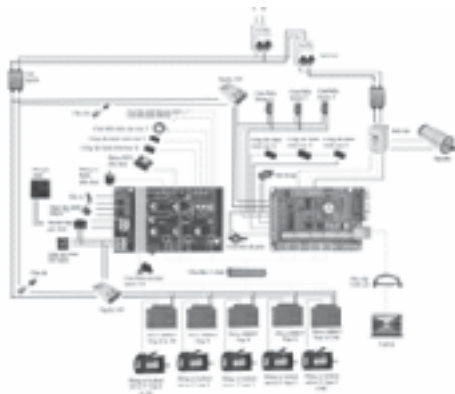
3. CHẾ TẠO VÀ THIẾT KẾ

3.1. Thiết kế hệ thống điều khiển

Bộ điều khiển chuyển động (Motion Controller) của máy cho chức năng CNC là board Mach3 với phần mềm Mach3, còn chức năng in 3D là board Arduino được nhúng firmware Marlin, cho phép sự xuất hiện của công nghệ gia công cắt gọt CNC và sản xuất bồi đắp in 3D trên cùng một thiết bị. Cách kết nối board mạch Mach3 và board Arduino cho động cơ cùng với các thiết bị khác được biểu diễn tại Hình 4. Hệ thống tự động chuyển đổi chức năng máy bằng cách sử dụng bo mạch Arduino Uno R3 điều khiển động cơ bước và các công tắc giới hạn hành trình, kết hợp nút bấm On/Off (Hình 5).



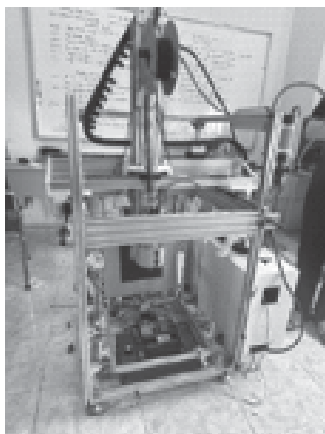
Hình 4. Sơ đồ hệ thống điện của máy



Hình 5. Sơ đồ hệ thống điện của tự động chuyển đổi chức năng

3.2. Chế tạo máy

Máy sau khi được tính toán thiết kế và gia công được lắp ráp hoàn chỉnh thể hiện ở hình 6.



Hình 6. Hình ảnh thực tế của máy sau khi đã lắp đặt hoàn chỉnh

4. GIA CÔNG VÀ THỬ NGHIỆM



Hình 7. Sản phẩm gia công

Sau khi người điều khiển kết nối máy tính với máy và bật công tắc khởi động, máy vào trạng thái chờ lệnh. Để bắt đầu một chương trình in 3D, người điều khiển cần đưa chi tiết gia công vào phần mềm Slicer (Cura Slicer), phần mềm sẽ cho ra chương trình G-code phù hợp. Sau đó, người điều khiển cần đưa G-code vào phần mềm điều khiển Pronterface để bắt đầu in. Quá trình in kết thúc, người điều khiển bật công tắc chuyển đổi để máy chuyển sang trạng thái CNC. Ở trạng thái CNC, người điều khiển đưa chi tiết cần gia công vào phần mềm NX để lấy G-code. G-code sau đó được tải lên Mach3 – không gian điều khiển CNC – để thao tác và xử lý. Kết thúc cả hai quá trình, các trục tự động về vị trí an toàn và sẵn sàng cho các mệnh lệnh tiếp theo. Một số sản phẩm mẫu được gia công thử nghiệm trên máy đã thiết kế được trình bày ở Hình 7.

5. KẾT LUẬN

Mục tiêu của bài báo này giới thiệu quy trình tính toán thiết kế và chế tạo máy in 3D đa năng tích hợp máy CNC nhằm phục vụ cho lĩnh vực giáo dục và nghiên cứu. Máy hoàn toàn có khả năng cạnh tranh với tất cả dòng máy cùng

phân khúc về công năng và với các máy cùng công năng về giá thành trong khi vẫn đảm bảo được những yêu cầu cơ bản về độ chính xác và chất lượng sản phẩm. Định hướng trong tương lai, máy có thể được nâng cấp lên 5 trục và hệ thống gá đặt tự động để hoàn toàn tự động hóa khâu sản xuất, tăng hiệu quả làm việc, rút ngắn thời gian lao động và ngày càng cải thiện về tính thẩm mỹ.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, đề tài mã số SV25-26.22. Nhóm tác giả cũng chân thành cảm ơn Công ty Cổ phần Nhựa kỹ thuật Vân Long – VanLongTechPlas đã hỗ trợ để đề tài được hoàn thiện.❖

Ngày nhận bài: **16/3/2026**

Ngày phản biện: **24/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. B. Elhazmiri, N. Naveed, M.N. Anwar, M.I.U. Haq, “*The role of additive manufacturing in industry 4.0: An exploration of different business models*”. Sustainable Operations and Computers 3 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.07.001>.
- [2]. K. Kanishka, B. Acherjee, “*Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges*”. J. Manuf. Process. 107 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.024>.
- [3]. M. Rodríguez-Martín, R. Domingo, J. Ribeiro, “*Mapping and prospective of additive manufacturing in the context of Industry 4.0 and 5.0*”. Rapid Prototyp. J. 30 (2024); <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2023-0410>.
- [4]. L. Maretto, M. Faccio, D. Battini, “*The adoption of digital technologies in the manufacturing world and their evaluation: A systematic review of real-life case studies and future research agenda*”. J. Manuf. Syst. 68 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.009>.
- [5]. Z. Zhu, V.G. Dhokia, A. Nassehi, S.T. Newman, “*A review of hybrid manufacturing processes - State of the art and future perspectives*”. Int. J. Comput. Integr. Manuf. 26 (2013); <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530>.