

CƠ CẤU MỀM ĐƯỢC CHẾ TẠO TỪ PHƯƠNG PHÁP PHUN ÉP NHỰA

THE SOFT MECHANISM IS FABRICATED USING THE PLASTIC INJECTION
MOLDING PROCESS

Nguyễn Văn Minh, Trần Phước Trung, Huỳnh Đỗ Song Toàn*

Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: minhngvan@hcmute.edu.vn;

19116143@student.hcmute.edu.vn; *toanhds@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày quá trình thực nghiệm và phân tích đặc tính đàn hồi của cơ cấu mềm dạng compliant mechanism được chế tạo bằng vật liệu nhựa PA6 (Polyamide 6) có gia cường sợi thủy tinh (Glass Fiber – GF) với các tỷ lệ khác nhau: 0%, 5%, 15%, 20% và 30%. Các mẫu được đo mô-men xoắn tương ứng với các góc quay từ 0° đến 275° nhằm khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ sợi thủy tinh đến khả năng chịu tải và biến dạng đàn hồi. Kết quả cho thấy mẫu PA6 không gia cường (0%GF) có khả năng biến dạng lớn, mô-men tăng dần theo góc quay với đặc tính phi tuyến, trong khi mẫu PA6-5%GF thể hiện độ cứng cao hơn và khả năng truyền lực tốt hơn ở vùng biến dạng lớn. Sự gia cường bằng sợi thủy tinh giúp tăng mô-men cực đại và độ ổn định cơ học, song làm giảm nhẹ tính linh hoạt tổng thể. Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa cơ cấu mềm bằng vật liệu composite nền nhựa, hướng tới ứng dụng trong robot mềm, cơ cấu truyền động linh hoạt và các thiết bị cơ điện tử có yêu cầu biến dạng đàn hồi lớn.

Từ khóa: Cơ cấu mềm; Biến dạng đàn hồi; PA6; Sợi thủy tinh (GF); Mô-men xoắn; Phun ép nhựa; Vật liệu composite.

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation and analysis of the elastic behavior of a compliant mechanism fabricated from PA6 (Polyamide 6) reinforced with glass fibers (GF) at various contents of 0%, 5%, 15%, 20%, and 30%. The torque response was measured at different rotation angles ranging from 0° to 275° to evaluate the influence of fiber content on load-bearing capacity and elastic deformation. The results show that the unreinforced PA6 (0%GF) exhibits high flexibility with a nonlinear increase in torque as the rotation angle increases, whereas the PA6-5%GF samples demonstrate higher stiffness and improved torque transmission in large deformation ranges. Glass fiber reinforcement enhances maximum torque and structural stability but slightly reduces overall flexibility. These findings provide a valuable basis for designing and optimizing soft mechanisms made from polymer composite materials, targeting applications in soft robotics, flexible actuators, and electromechanical systems requiring large elastic deformation.

Keywords: Soft mechanism; Elastic deformation; PA6; Glass fiber (GF); Torque; Injection molding; Composite materials.

1. TỔNG QUAN

Cơ cấu mềm là một trong những xu hướng thiết kế tiên tiến trong lĩnh vực cơ khí hiện đại, cho phép cấu trúc cơ học có thể biến dạng đàn hồi lớn mà vẫn duy trì khả năng điều khiển chính xác chuyển động. Việc chế tạo các cơ cấu mềm bằng vật liệu polymer hoặc vật liệu composite nền nhựa giúp đạt được sự linh hoạt cao, trọng lượng nhẹ, và khả năng hấp thụ năng lượng tốt, từ đó mở rộng phạm vi ứng dụng trong robot mềm, thiết bị y sinh, và các hệ thống cơ cấu thích ứng. Trong bối cảnh đó, công nghệ phun ép nhựa (injection molding) được xem là phương pháp tiềm năng để chế tạo hàng loạt các cơ cấu mềm với độ chính xác và khả năng tái lập cao.

Một trong những hướng nghiên cứu được quan tâm hiện nay là sử dụng composite gỗ-nhựa (Wood-Plastic Composites, WPCs) trong chế tạo các chi tiết hoặc cơ cấu mềm. WPCs là vật liệu composite có pha gia cường là gỗ và pha nền là nhựa nhiệt dẻo hoặc nhựa nhiệt rắn [1, 2, 3]. Trong quá trình sản xuất, các hạt gỗ hoặc sợi gỗ (sawdust hoặc wood fibers) thường là sản phẩm phụ của ngành chế biến gỗ hoặc được nghiền từ các loại cây không đủ tiêu chuẩn làm gỗ thương phẩm. Các sợi hoặc bột gỗ này được phối trộn với polymer nền như polypropylene (PP), polyethylene (PE) hoặc polyvinyl chloride (PVC), kèm theo các chất phụ gia như chất tương hợp, chất ổn định nhiệt và chất độn vô cơ, nhằm cải thiện tính chất cơ lý của vật liệu và tương tác giữa hai pha vật liệu [4].

Quá trình phun ép nhựa là một trong những phương pháp phổ biến để tạo hình vật liệu WPC. Trong đó, hỗn hợp nhựa và gỗ được nung chảy, nén và ép vào lòng khuôn dưới áp suất cao, sau đó làm nguội để tạo ra sản phẩm

có hình dạng mong muốn. Phương pháp này cho phép sản xuất chi tiết có hình học phức tạp, độ chính xác cao và khả năng tái lập ổn định hơn so với phương pháp ép nén hoặc đùn. Tuy nhiên, cơ chế tương tác giữa các pha vật liệu trong quá trình phun ép, cũng như ảnh hưởng của thông số công nghệ đến tính chất cơ học, vẫn là vấn đề đang được nghiên cứu [5, 6].

Một trong những thách thức chính khi gia công WPC bằng phun ép là độ nhạy nhiệt của gỗ. Gỗ bắt đầu phân hủy nhiệt trong dải nhiệt độ tương đương với nhiệt độ gia công của hầu hết nhựa nhiệt dẻo, dẫn đến hiện tượng cháy hoặc suy giảm cơ tính của sản phẩm nếu nhiệt độ gia công quá cao [5]. Các nghiên cứu cho thấy trong quá trình phối trộn (compounding) và tái chế, sự phân hủy của thành phần gỗ có thể làm giảm độ bền kéo và độ cứng của composite. Ngoài ra, việc tái chế nhiều lần cũng gây ra suy giảm độ kết dính giữa pha gỗ và nhựa, ảnh hưởng đến tính chất lâu dài của vật liệu [6].

So sánh giữa phương pháp đùn (extrusion) và phun ép (injection molding) cho thấy phun ép mang lại tính chất cơ học cao hơn nhờ áp suất và ứng suất cắt lớn hơn trong quá trình gia công, giúp phân tán sợi gỗ tốt hơn trong nền nhựa và tăng cường tương tác giữa các pha vật liệu [7]. Tuy nhiên, quy trình phun ép WPC chưa được nghiên cứu sâu rộng trong tài liệu hiện có. Một số công trình đề cập đến việc tạo bọt (foaming) trong phun ép để giảm khối lượng và tăng khả năng cách âm, cách nhiệt [8, 9]. Các nghiên cứu khác so sánh tính chất giữa sản phẩm đúc nén và phun ép, chỉ ra sự khác biệt về độ bền, độ cứng và mật độ khuyết tật [10].

Các nghiên cứu gần đây cũng xem xét kỹ thuật phủ (overmolding) khi kết hợp lớp

gỗ hoặc ván ép với lớp nhựa, nhằm cải thiện khả năng kết dính bề mặt và nâng cao độ bền liên kết giữa hai vật liệu [11]. Tuy nhiên, thách thức lớn trong phun ép WPC là đảm bảo dòng chảy của vật liệu trong khuôn phức tạp và kiểm soát hiện tượng rỗ khí, cháy bề mặt hoặc không điền đầy khuôn. Nghiên cứu [12] đã chỉ ra rằng thiết kế hệ thống khuôn, công phun, và nhiệt độ khuôn đóng vai trò rất quan trọng; đặc biệt, cần duy trì nhiệt độ khuôn tối thiểu đủ cao để vật liệu có thể điền đầy lòng khuôn mà không gây nứt hoặc rỗ bề mặt. Ngoài ra, công đoạn sấy khô nguyên liệu trước khi phun ép là bắt buộc để tránh bọt khí và sai hỏng trên bề mặt sản phẩm [12]. Tác giả [13] nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nóng chảy đến tính chất cơ học của WPC nền polyethylene (PE) và nhận thấy khi tăng nhiệt độ, mô đun đàn hồi và độ bền kéo giảm nhẹ do sự phân hủy vi mô của thành phần gỗ. Điều này cho thấy việc lựa chọn thông số công nghệ thích hợp là yếu tố then chốt để cân bằng giữa khả năng gia công và chất lượng cơ học của sản phẩm. Bên cạnh đó, nhiều công trình khác tập trung vào ảnh hưởng của thời gian lưu (residence time) trong xilanh phun ép và tốc độ làm nguội khuôn, vì các yếu tố này quyết định mức độ phân bố nhiệt trong vật liệu, ảnh hưởng đến cấu trúc tinh thể của polymer và sự kết dính giữa pha gỗ–nhựa.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào vật liệu WPC, sự ảnh hưởng của thông số công nghệ phun ép đến tính chất cơ học và hình thái của sản phẩm vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Việc hiểu rõ cơ chế này không chỉ có ý nghĩa trong sản xuất ban đầu mà còn trong tái chế phế liệu và tái sử dụng vật liệu composite. Do đó, mục tiêu của các nghiên cứu gần đây là đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ nhựa nóng chảy, nhiệt độ khuôn, và thời gian lưu đến các đặc trưng cơ học (như độ bền kéo, mô đun đàn hồi) cũng như đặc tính màu sắc của vật liệu WPC, qua đó tối ưu hóa quá trình phun ép để đạt chất lượng sản phẩm cao nhất.

Nhìn chung, công nghệ phun ép cho phép tạo hình các cơ cấu mềm composite nền nhựa với khả năng kiểm soát chính xác hình học và tính chất vật liệu, mở ra hướng phát triển mới cho các sản phẩm cơ khí có tính linh hoạt cao. Tuy nhiên, để chế tạo các cơ cấu mềm hoạt động ổn định và bền vững, cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về mối quan hệ giữa cấu trúc vật liệu, điều kiện công nghệ và cơ chế biến dạng đàn hồi. Việc kết hợp các công cụ mô phỏng (như ANSYS, Moldflow) với thực nghiệm sẽ giúp hiểu rõ hơn quá trình truyền nhiệt, phân bố áp suất và dòng chảy trong lòng khuôn, từ đó tạo cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa thiết kế khuôn và quy trình chế tạo cơ cấu mềm bằng phương pháp phun ép nhựa trong tương lai.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong lĩnh vực kỹ thuật, các chi tiết thường được liên kết với nhau bằng các kết nối truyền thống như: khớp bản lề, khớp sách tiến trình, khớp cầu. Các chế độ cố định hạn chế của các trận đầu này luôn tồn tại ở một khoảng thời gian nên sẽ gây ra sai số truyền động và sai số này thường có kích thước 0,01 mm. Ngoài ra, trong tất cả các loại truyền thống kết nối phù hợp luôn có năng lực. Lực này là nguyên nhân làm giảm hiệu suất, gây mài mòn các chi tiết, làm tăng khe hở trong kết nối theo thời gian, từ đó làm giảm chất lượng hoạt động của thiết bị cũng như chất lượng của sản phẩm. Các câu trả lời về việc làm truyền thống không phù hợp với các cấu hình máy có yêu cầu độ chính xác cao (kích thước 0,001 mm) hay không phản đối điều kiện làm sạch và nhu cầu làm việc trong chân không [7].

Một trong những giải pháp giải quyết vấn đề này để giải quyết phần thưởng của hệ thống truyền tải phù hợp là việc sử dụng cơ chế phục hồi. Cơ sở cấu hình đàn hồi/mềm cũng cho phép truyền tải hoặc chuyển đổi chuyển động, năng lượng và thời điểm. Tuy nhiên,

không giống hệ thống truyền tải cấu hình cơ sở, cấu hình cơ sở phức hồi có thể thực hiện ít nhất một hoặc một vài chuyển động hỗ trợ cho dạng biến thể của các nhóm hồi phục không chỉ dựa vào các loại sử dụng thường xuyên phù hợp. Một ví dụ minh họa các cấu hình cơ sở phổ biến như Hình 1. Một dạng cấu hình cơ sở thường được sử dụng khi tổng hợp cấu hình cơ sở phù hợp với bảng tổng hợp. Nó có cấu hình đơn giản từ một khối dữ liệu được cắt khoét một phần và tạo ra chuyển động dựa trên độ mềm trong vật liệu thân máy. Chính vì vậy, nó giải quyết được các điểm yếu của truyền thống trận đấu. Do không phải chế tạo từ nhiều chi tiết khác nhau nên khớp nối đàn hồi không tồn tại tại các nhược điểm như: ma sát, ồn ào, mài mòn, phải bôi trơn và khe hở. Ngoài ra, nó còn tiết kiệm được không gian và giảm chi phí của các bộ phận, vật liệu, lắp ráp và bảo trì. Kết nối khối cấu hình của kết nối được trả lời ưu tiên khi sử dụng để truyền động có độ chính xác ở mức micro và dưới micro trong các tác vụ cần độ chính xác cao hay trong các thiết bị y sinh học, các hệ thống thông tin điện tử [7].

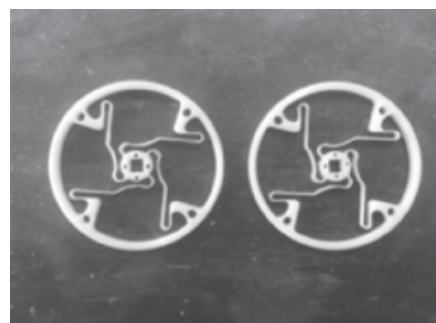


Hình 1. Các cơ cấu mềm phổ biến

3. MÔ HÌNH SẢN PHẨM CƠ CẤU MỀM

Mô hình được thiết kế trên phần mềm Creo Parametric, tiếp theo được thiết kế khuôn ép phun cho mô hình này, gia công bộ khuôn và lắp ráp. Sau đó, mô hình được ép phun với những vật liệu nhựa PA6 và PA6 30%GF với những trường hợp tương ứng với những tỷ lệ

khối lượng trộn giữa hai loại nhựa khác nhau, bao gồm 0%, 5%, 15%, 20%, 30%, cụ thể những tỷ lệ phần trăm đã nêu là tỷ lệ khối lượng trộn của vật liệu nhựa tái sinh.



Hình 2. Cơ cấu mềm dùng trong nghiên cứu này

Hình 2 mô tả thông số hình học của mô hình cơ cấu mềm dạng “Compliant”. Cơ cấu có hình dáng là hình tròn với đường kính đường bao là $\varnothing 100 \times 5\text{mm}$ và được gia công bằng phương pháp phun ép nhựa với vật liệu nhựa PA6 và PA6 30%GF được trộn với nhau với tỷ lệ trộn như đã nêu ở trên. Mô hình này có tổng cộng 4 dây có bề dày 1mm được nối từ hình trụ tròn ở tâm với đường bao hình tròn ở bên ngoài. Bốn dây này có thể giãn dài ra tùy theo góc xoắn.

(*) Thông số phun ép

Theo yêu cầu của nghiên cứu này, thông số ép phun của từng loại nhựa không được thay đổi trong từng trường hợp trong quá trình ép mô hình. Thông qua sự hướng dẫn của giáo viên hướng dẫn và nghiên cứu những thông số kỹ thuật của từng loại nhựa và đã thử nghiệm trên máy ép nhựa, em đưa ra thông số phun ép nhựa như sau:

Sử dụng thông số ép nhựa của PA6 30% GF áp dụng cho tất cả các trường hợp còn lại: 0%, 5%, 15%, 20%, 30%.



Bảng 1. Thông số nhựa PA6 0%

TH	Filling time (s)	Filling press (bar)	Packing time(s)	Packing press(bar)	Cooling time(s)	Melt temperature (độ C)	Filling speed (%)
1	2	80	1	75	25	250	50 52 54 56 58

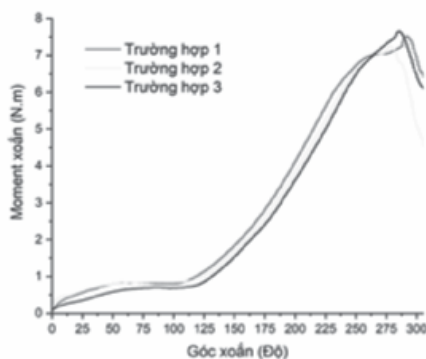
4. KẾT QUẢ ĐO BIẾN DẠNG

Qua quá trình làm thực nghiệm đo biến dạng đàn hồi của mô hình cơ cấu mềm dạng “Compliant” với những vật liệu nhựa PA6 được gia cố thêm sợi thủy tinh tương ứng với những trường hợp: 0%, 5%, 15%, 20% và 30%, kết quả đo mô-men của những trường hợp được trình bày ở những bảng sau, với Input là giá trị góc độ quay trung bình cộng của 3 giá trị đầu vào, 3 giá trị Output 1, 2 và 3 là giá trị mô-men xoắn đo được của 3 mẫu của từng trường hợp và giá trị Avg. Out là giá trị trung bình Output của 3 mẫu được đo.

- Trường hợp PA6 0%GF:

Bảng 2. Bảng thông số thí nghiệm đo được của trường hợp PA6 0%GF

Input (độ)	0	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
Lần 1 (N.m)	0	0.58	0.68	0.69	0.85	1.51	2.41	3.6	5.02	6.47	7.31
Lần 2 (N.m)	0	0.79	0.83	0.8	1.01	1.7	2.61	3.85	5.26	6.57	7.13
Lần 3 (N.m)	0	0.78	0.84	0.82	1.12	1.81	2.78	4.01	5.63	6.73	7.04
Avg (N.m)	0	0.71	0.78	0.77	0.99	1.67	2.6	3.82	5.3	6.59	7.16



Hình 3. Biểu đồ thể hiện đặc tính mô-men của những trường hợp PA6 0%GF

Dữ liệu thu được cho trường hợp PA6 tinh khiết (0% sợi thủy tinh) cho thấy đặc tính của vật liệu có độ dẻo và khả năng biến dạng đàn hồi khá cao. Ở giai đoạn đầu, khi góc quay nhỏ hơn 75°, giá trị mô-men xoắn tăng nhẹ và gần như tuyến tính theo góc quay, thể hiện vùng đàn hồi tuyến tính của cơ cấu. Cụ thể, tại 50° góc xoay, mô-men trung bình đạt khoảng 0,71 N.m, và đến 100°, giá trị này tăng lên 0,99 N.m, cho thấy cơ cấu phản ứng ổn định khi chịu tải nhỏ.

Khi góc quay vượt quá 125° , độ dốc của đường cong mô-men tăng rõ rệt – biểu hiện của sự tăng độ cứng cơ học do biến dạng đàn hồi phi tuyến. Giá trị mô-men trung bình đạt 1,67 N·m tại 150° và 2,60 N·m tại 175° , sau đó tăng mạnh lên 5,30 N·m tại 225° và 7,16 N·m tại 275° . Đường cong thể hiện sự phi tuyến tăng dần, đặc trưng cho cơ cấu mềm có sự phân bố ứng suất không đồng đều, trong đó vùng cổ cơ cấu chịu nén và kéo mạnh dần khi góc xoay tăng.

Điểm đáng chú ý là sự đồng nhất của ba lần đo, cho thấy kết quả ổn định, sai số thấp. Điều này khẳng định quá trình thí nghiệm và

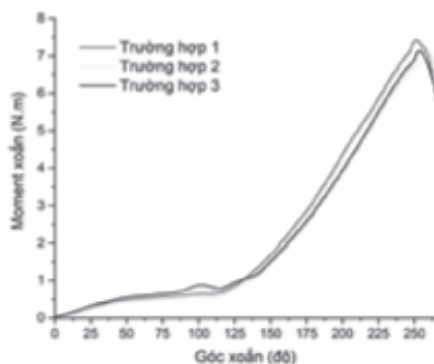
vật liệu PA6 thuần có khả năng lặp lại tốt. Tuy nhiên, do không có sợi thủy tinh gia cường, vật liệu này có giới hạn chịu tải thấp hơn, mặc dù đạt được biên độ biến dạng lớn. Điều này phù hợp với đặc tính của PA6 tinh khiết – mềm dẻo, đàn hồi tốt nhưng khả năng chịu mô-men cao bị hạn chế.

Hình 3 cho thấy đồ thị mô-men theo góc quay có dạng cong mượt, liên tục tăng, biểu thị mối quan hệ gần như phi tuyến bậc hai giữa mô-men và góc quay. Đây là đặc trưng của cơ cấu compliant khi chịu biến dạng lớn mà không phá hủy cấu trúc vật liệu.

• Trường hợp PA6 5%GF:

Bảng 3. Bảng thông số thí nghiệm đo được của trường hợp PA6 5%GF

Input (độ)	0	25	50	75	100	125	150	175	225	250	260
Lần 1 (N.m)	0	0.25	0.43	0.5	0.54	0.77	1.49	2.52	5.39	7.1	0.65
Lần 2 (N.m)	0	0.27	0.45	0.57	0.64	0.87	1.50	2.54	5.4	6.69	0.68
Lần 3 (N.m)	0	0.28	0.48	0.65	0.87	0.89	1.66	2.64	5.89	6.69	0.64
Avg (N.m)	0	0.26	0.45	0.57	0.68	0.84	1.55	2.56	5.56	6.82	0.65



Hình 4. Biểu đồ thể hiện đặc tính mô-men của những trường hợp PA6 5%GF

Khi bổ sung 5% sợi thủy tinh, cơ tính của vật liệu thay đổi rõ rệt. Sợi thủy tinh hoạt động như các pha gia cường, làm tăng mô đun đàn hồi của vật liệu, giúp cơ cấu cứng hơn

nhưng giảm nhẹ khả năng biến dạng đàn hồi. Dữ liệu trong Bảng 3 cho thấy ở các góc nhỏ (dưới 75°), mô-men xoắn tăng chậm, giá trị trung bình chỉ khoảng 0,26 N·m tại 25° và 0,57 N·m tại 75° , thấp hơn một chút so với PA6 0%GF ở cùng góc xoay. Điều này phản ánh độ dẻo của vật liệu bị giảm, do sợi thủy tinh hạn chế chuyển vị của pha polymer nền.

Từ 100° trở đi, đường cong mô-men bắt đầu tăng nhanh hơn. Tại 150° , mô-men trung bình đạt 1,55 N·m, tương đương với PA6 0%GF, cho thấy ở vùng biến dạng lớn, tác dụng gia cường bắt đầu phát huy rõ rệt. Đặc biệt, tại 225° và 250° , giá trị mô-men trung bình đạt 5,56 N·m và 6,82 N·m, gần tương đương với PA6 0%GF, mặc dù góc xoay nhỏ hơn (trong

khoảng 225-260° so với 275° ở mẫu không gia cường). Điều này chứng tỏ rằng việc thêm 5% sợi thủy tinh giúp tăng khả năng truyền lực và ổn định biến dạng, trong khi vẫn duy trì tính đàn hồi tổng thể của cơ cấu.

Tuy nhiên, khi góc vượt quá 250°, giá trị mô-men giảm mạnh xuống khoảng 0,65 N·m, có thể do hiện tượng trượt hoặc tách lớp vi mô trong vùng tiếp xúc giữa pha polymer và sợi thủy tinh. Đây là giới hạn đàn hồi của vật liệu trong điều kiện gia cường thấp, khi ứng suất cục bộ vượt quá khả năng bám dính giữa hai pha.

Hình 4 minh họa rõ ràng đặc tính phi tuyến hai giai đoạn: giai đoạn đầu (0-100°) có độ dốc nhỏ, biểu thị vùng đàn hồi tuyến tính, và giai đoạn sau (trên 125°) có độ dốc tăng nhanh, phản ánh vùng tăng cứng do sự căng giãn đồng thời của cả pha polymer và pha sợi thủy tinh. Sự chuyển pha này là đặc trưng cơ học của composite có gia cường sợi ngắn.

5. KẾT LUẬN

So sánh hai trường hợp PA6 0%GF và 5%GF cho thấy ảnh hưởng của sợi thủy tinh là tăng độ cứng và khả năng chịu tải của cơ cấu, trong khi giảm nhẹ độ dẻo tổng thể. PA6 thuần cho biến dạng lớn và đường cong mô-men mượt, trong khi PA6-5%GF thể hiện phản ứng cơ học mạnh hơn ở vùng góc lớn, với khả năng duy trì giá trị mô-men cao trong phạm vi biến dạng trung bình.

Kết quả thực nghiệm chứng minh rằng tỷ lệ sợi thủy tinh thấp ($\approx 5\%$) là tối ưu để cân bằng giữa tính đàn hồi và khả năng chịu lực xoắn, phù hợp với yêu cầu của các cơ cấu mềm cần vừa linh hoạt vừa bền vững. Xu hướng này mở ra hướng thiết kế vật liệu composite ứng

dụng trong các cơ cấu compliant có khả năng tự phục hồi biến dạng và hoạt động bền bỉ trong môi trường làm việc có tải trọng thay đổi.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Văn Minh, Huỳnh Đỗ Song Toàn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Văn Minh, Trần Phước Trung, Huỳnh Đỗ Song Toàn.

(*) Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện và hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này (Mã số đề tài: T2024-31).❖

Ngày nhận bài: 16/10/2025

Ngày phản biện: 30/10/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Bledzki, A. K., & Faruk, O. (2004), “*Wood fiber reinforced polypropylene composites: Compression and injection molding process*”. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 43(3), 871-888, <https://doi.org/10.1081/PPT-120030034>.
- [2]. Burgstaller, C. (2007), “*Processing of thermal sensitive materials – A case study for wood plastic composites*”. Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly, 138(4), 343-346, <https://doi.org/10.1007/s00706-007-0608-5>.
- [3]. Burgstaller, C., & Renner, K. (2023), “*Recycling of wood-plastic composites – A reprocessing study*”. Macromolecules, 3(3), 754-765, <https://doi.org/10.3390/macromol3030043>.
- [4]. Gosselin, R., Rodrigue, D., & Riedl, B.

- (2006a), “*Injection molding of postconsumer wood-plastic composites I: Morphology*”. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(6), 639-657, <https://doi.org/10.1177/0892705706066535>.
- [5]. Gosselin, R., Rodrigue, D., & Riedl, B. (2006b), “*Injection molding of postconsumer wood-plastic composites II: Mechanical properties*”. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(6), 659-669, <https://doi.org/10.1177/0892705706066536>.
- [6]. Golmakani, M. E., Wiczenbach, T., Malikan, M., Aliakbari, R., & Eremeyev, V. A. (2021), “*Investigation of wood flour size, aspect ratios, and injection molding temperature on mechanical properties of wood flour/polyethylene composites*”. *Materials*, 14(12), 3406, <https://doi.org/10.3390/ma14123406>.
- [7]. Jafarian Jam, N., & Hossein Behraves, A. (2009), “*Challenge to the production of fine wood-plastic injection molded composites*”. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(1), 73-82, <https://doi.org/10.1177/0731684408091545>.
- [8]. Kumar, V., Tyagi, L., & Sinha, S. (2011), “*Wood flour-reinforced plastic composites: A review*”. *Reviews in Chemical Engineering*, 27(6), 253-264, <https://doi.org/10.1515/revce.2011.008>.
- [9]. Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., & Wolcott, M. P. (2009), “*Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites*”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(1), 80-85, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.10.004>.
- [10]. Mital'ová, Z., Mital', D., & Berladir, K. (2024), “*A concise review of the components and properties of wood-plastic composites*”. *Polymers*, 16(7), 1556, <https://doi.org/10.3390/polym16071556>.
- [11]. Stadlmann, A., Mautner, A., Pramreiter, M., Bismarck, A., & Müller, U. (2021), “*Interfacial adhesion and mechanical properties of wood-polymer hybrid composites prepared by injection molding*”. *Polymers*, 13(17), 2849, <https://doi.org/10.3390/polym13172849>.
- [12]. Xu, K., Du, G., & Wang, S. (2021), “*Wood plastic composites: Their properties and applications*”. In *Engineered Wood Products for Construction* (Chap. 12, pp. 197-221), IntechOpen, <https://doi.org/10.5772/intechopen.95542>.
- [13]. Yadav, S. M., Lubis, M. A. R., & Sihag, K. (2021), “*A comprehensive review on process and technological aspects of wood-plastic composites*”. *Journal of Sylva Lestari*, 9(3), 329-356, <https://doi.org/10.23960/jsl.v9i3.329-356>.