

## Research on Manufacturing Composite Materials on the Basis of PLA/Talc in Application of 3D Printing Technology

Thien Dinh Le<sup>1</sup>, Tien Trung Vu<sup>1</sup>, Huy Lam Pham<sup>1</sup>, Ngoc Thu Nguyen<sup>1</sup>, Minh Thanh Le<sup>1</sup>,  
Thanh Huy Le<sup>1</sup>, Chi Nhan Ha Thuc<sup>1\*</sup>

University of Science, Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

\*Corresponding author. Email: [hcnhan@hcmus.edu.vn](mailto:hcnhan@hcmus.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 14/06/2025  
Revised: 11/08/2025  
Accepted: 15/08/2025  
Published: 28/11/2025

### KEYWORDS

PLA;  
Composite;  
3D printing technology;  
Talc;  
Biodegradable.

### ABSTRACT

This study aims to fabricate a biodegradable composite material based on Polylactic acid (PLA) and Talc powder, then evaluate the impact of the PLA-g-MAH compatibilizer (MAH) on the properties of the material. The influence of Talc powder and MAH on PLA is characterized through mechanical properties, melt flow index (MFI), thermal properties, and morphology of the material. The results show that the structure and properties of the PLA/Talc mixture differ from those of PLA/Talc/MAH and pure PLA. The presence of PLA-g-MAH (MAH) enhances the flexural strength, impact strength, and tensile strength of pure PLA. Through DSC analysis, we found that the glass transition temperature ( $T_g$ ) increased, and the cold crystallization temperature ( $T_c$ ) decreased when Talc and PLA-g-MAH (MAH) were blended into PLA compared to pure PLA. TGA analysis showed that the addition of Talc reduced the thermal stability of PLA, and decomposition occurred at a lower temperature as the Talc content increased. SEM images of the material indicated that Talc flakes were fairly evenly distributed in the polymer matrix without significant aggregation. In addition, the biodegradable composite material PLA/Talc/MAH was studied by increasing the Talc content in the mixture, contributing to improving tensile strength, hardness and dimensional stability due to the ability to limit the movement of polymer chains in the PLA matrix. The results showed that the PLA/Talc/MAH mixture with 10% Talc by weight exhibited a higher melt flow index (MFI) than pure PLA, and the mechanical properties of this mixture were sufficient to produce 3D filaments.

## Nghiên cứu chế tạo vật liệu Composite trên cơ sở PLA/Talc định hướng ứng dụng trong công nghệ in 3D

Lê Thiên Đình<sup>1</sup>, Vũ Tiến Trung<sup>1</sup>, Phạm Huy Lâm<sup>1</sup>, Nguyễn Ngọc Thu<sup>1</sup>, Lê Minh Thành<sup>1</sup>,  
Lê Thanh Huy<sup>1</sup>, Hà Thúc Chí Nhân<sup>1\*</sup>

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ. Email: [hcnhan@hcmus.edu.vn](mailto:hcnhan@hcmus.edu.vn)

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 14/06/2025  
Ngày hoàn thiện: 11/08/2025  
Ngày chấp nhận đăng: 15/08/2025  
Ngày đăng: 28/11/2025

### TỪ KHÓA

PLA;  
Composite;  
Công nghệ in 3D;

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm chế tạo vật liệu composite phân hủy sinh học trên cơ sở Polylactic acid và bột Talc, tiếp đó đánh giá sự tác động của chất trợ tương hợp PLA-g-MAH (MAH) đến tính chất của vật liệu. Sự ảnh hưởng của bột Talc và MAH lên PLA được đặc trưng qua tính chất cơ lý, chỉ số chảy (MFI), tính chất nhiệt và hình thái học của vật liệu. Kết quả cho thấy cấu trúc và tính chất của hỗn hợp PLA/Talc khác với PLA/Talc/MAH và khác với PLA nguyên sinh. Với sự có mặt của PLA-g-MAH trong hỗn hợp vật liệu làm tăng độ bền uốn, độ bền va đập và tăng độ kéo cao hơn PLA nguyên sinh. Bảng phương pháp phân tích DSC chúng tôi nhận thấy rằng nhiệt độ chuyển hóa thủy tinh ( $T_g$ ) tăng và nhiệt độ kết tinh lạnh ( $T_c$ ) của vật liệu giảm khi phối trộn Talc và PLA-g-MAH (MAH) vào PLA so với

Talc;

Phân hủy sinh học.

PLA nguyên sinh. Qua phân tích TGA chúng tôi thấy rằng thấy việc bổ sung Talc làm giảm độ bền nhiệt của PLA và sự phân hủy xảy ra ở nhiệt độ thấp hơn khi hàm lượng Talc tăng. Ảnh chụp SEM của vật liệu cho thấy các phiến Talc phân bố khá đều trên nền polymer và không có sự kết tụ rõ ràng. Ngoài ra, vật liệu composite phân hủy sinh học PLA/Talc/MAH được nghiên cứu làm tăng hàm lượng Talc trong hỗn hợp góp phần cải thiện độ bền kéo, độ cứng và ổn định kích thước do khả năng hạn chế sự di chuyển của các mạch polymer trong nền PLA. Kết quả chỉ ra rằng hỗn hợp PLA/Talc/MAH với 10% trọng lượng Talc cho thấy chỉ số chảy (MFI) cao hơn PLA nguyên sinh và các đặc tính cơ lý của hỗn hợp này đủ để tạo ra sợi 3D.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1949>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

## 1. Giới thiệu

Nhờ các đặc tính tiện lợi, giá thành thấp và sự đa dạng trong sản phẩm, vật liệu polymer đã trở thành nguyên liệu được sản xuất và sử dụng rộng rãi. Tuy nhiên, phần lớn các sản phẩm nhựa, đặc biệt là nhựa từ dầu mỏ, có khả năng phân hủy kém hoặc phân hủy rất chậm (hàng trăm năm). Hai yếu tố trên đã dẫn đến sự gia tăng ô nhiễm nhựa trong môi trường. Tình trạng ô nhiễm rác thải nhựa đang ở mức báo động và đã trở thành mối quan tâm lớn của nhiều quốc gia, bởi không chỉ gây hại đến môi trường sống mà còn đe dọa nghiêm trọng đến hệ sinh thái, bao gồm con người, động vật và thực vật. Một giải pháp khả thi nhằm giảm thiểu vấn đề này là thay thế các sản phẩm nhựa truyền thống bằng nhựa phân hủy sinh học thân thiện với môi trường.

Trong số đó, nhựa sinh học Polylactic acid (PLA) được coi là một giải pháp phù hợp, vì đây là một loại polymer sinh học có khả năng phân hủy, thay thế nhựa truyền thống. PLA là polymer sinh học có khả năng phân hủy sinh học trong đất, nước hoặc điều kiện ủ công nghiệp, tạo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O và sinh khối [1]. PLA đang được nghiên cứu và phát triển để ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Ngoài các ứng dụng phổ biến như bao bì ngăn hạn, PLA còn có tiềm năng lớn trong việc tạo ra các vật liệu composite dùng trong các ứng dụng chuyên biệt, bao gồm linh kiện ô tô, thiết bị điện tử, hàng hóa lâu bền và bao bì dài hạn. Tuy nhiên, PLA tồn tại một số nhược điểm như cơ tính kém ổn định, khả năng chịu nhiệt hạn chế và đặc tính ngăn cản khí không cao, điều này làm giảm khả năng ứng dụng trong thực tế. Một phương pháp khả thi để khắc phục các hạn chế này là sử dụng kỹ thuật pha trộn. Việc phối trộn các chất liệu khác vào PLA nhằm tạo ra vật liệu composite có các tính năng vượt trội là giải pháp vừa mang tính kinh tế vừa mang tính công nghệ. Điều này giúp giảm chi phí sản xuất composite và đồng thời cải thiện các đặc tính như độ ổn định kích thước, độ bền, hoặc độ cứng [2].

Trong thập kỷ qua, nhiều loại chất độn, từ vô cơ đến hữu cơ, với kích thước từ micron đến nano, đã được pha trộn vào PLA để tạo ra các vật liệu composite đa dạng. Đặc biệt, chất độn vô cơ như CaCO<sub>3</sub>, khoáng sét cấu trúc lớp, SiO<sub>2</sub>, Talc... đã được chứng minh có khả năng cải thiện tính chất cơ lý và tính chất nhiệt của vật liệu composite, khi được phân tán và tương hợp tốt trong nền PLA. Các loại vật liệu composite này có tiềm năng rất lớn trong việc ứng dụng vào các sản phẩm in 3D, vốn đang ngày càng phổ biến và sử dụng nền vật liệu từ PLA. Việc bổ sung bột talc vào nền polymer PLA (Polylactic Acid) đã được chứng minh là một giải pháp hiệu quả nhằm cải thiện các tính chất cơ lý và nhiệt của vật liệu. Bột talc, với bản chất là một chất độn vô cơ có cấu trúc lớp, đóng vai trò như một chất xúc tiến kết tinh (nucleating agent), giúp tăng mức độ kết tinh của PLA và từ đó nâng cao độ cứng cũng như nhiệt độ biến dạng nhiệt (HDT) của vật liệu [3]. Ngoài ra, talc còn góp phần cải thiện độ bền kéo, độ cứng và ổn định kích thước do khả năng hạn chế sự di chuyển của các mạch polymer trong nền PLA [4]. Việc đưa talc vào cũng góp phần làm giảm giá thành sản phẩm do talc có chi phí thấp hơn so với PLA nguyên chất. Hơn nữa, sự hiện diện của talc có thể ảnh hưởng đến tốc độ phân hủy sinh học của PLA, giúp điều chỉnh thời gian phân rã vật liệu phù hợp với yêu cầu sử dụng [5]. Như vậy, việc phối trộn talc vào PLA không chỉ nâng cao hiệu suất gia công mà còn mở rộng khả năng ứng dụng của vật liệu này trong các lĩnh vực bao bì, in 3D và các sản phẩm sử dụng ngắn hạn. Dựa trên những tiềm năng trên nghiên cứu

tập trung vào tiềm năng ứng dụng làm vật liệu in 3D, đáp ứng nhu cầu phát triển các sản phẩm in 3D thân thiện với môi trường.

## 2. Vật liệu và phương pháp

### 2.1. Hóa chất

PLA LX175 và PLA LX105 (Corbion, Hà Lan). Bột Talc: PLUSTALC H15 (MONDO & ELEMENTIS, Hà Lan). Chất trợ tương hợp PLA-g-MAH (Trung Quốc).

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

#### 2.2.1. Chế tạo vật liệu composite PLA/Talc và PLA/Talc/PLA-g-MAH

Trước tiên, hạt nhựa PLA được sấy khô ở nhiệt độ 80°C trong 2 giờ và sau đó được bảo quản trong bình tránh ẩm. Tiếp theo, các hạt PLA được nấu chảy và pha trộn với các tỷ lệ chất độn quy định, sử dụng máy trộn nóng chảy trục vít đôi (Internal Mixer: MX300, hãng Chareontut, Thái Lan). Nhiệt độ buồng trộn được duy trì ở 210°C, với tốc độ quay của trục vít là 40 vòng/phút. Quá trình trộn kéo dài trong 10 phút, sau đó khối vật liệu được ép định hình bằng máy ép gia nhiệt trong 5 phút ở nhiệt độ 190°C để tạo mẫu thử nghiệm. Quy trình tổng hợp này cũng được áp dụng tương tự trong chế tạo vật liệu composite với bột Talc và chất trợ tương hợp. Hàm lượng chất trợ tương hợp được thêm vào chiếm 5% khối lượng bột Talc trong hỗn hợp, nhằm cải thiện tính chất cơ lý và nhiệt của sản phẩm cuối cùng.

#### 2.2.2. Tạo sợi in 3D

Quy trình tạo nguyên liệu in 3D được thực hiện bằng phương pháp đùn kéo sợi và cuộn thành phẩm bằng thiết bị 20 lab 3D printer filament machine của hãng Delta (Trung Quốc). Đầu tiên, các mẫu PLA và PLA composite sau khi được trộn nóng chảy được cắt thành hạt nhỏ và bảo quản trong túi kín khí trong 24 giờ. Sau đó, các hạt nhựa này được đưa vào máy đùn trục vít đơn để tiến hành kéo sợi. Quá trình được thực hiện bằng thiết bị đùn sợi in 3D có xuất xứ từ Trung Quốc (Hình 1), với đường kính sợi được kiểm soát ổn định ở mức 1,65 mm. Các cuộn sợi sau khi hoàn thành được bảo quản trong tủ sấy nhiệt để đảm bảo tính ổn định và ngăn ngừa hiện tượng hút ẩm. Cuộn sợi in được giữ trong tủ sấy liên tục, sau đó được lấy ra để sử dụng cho quá trình in mẫu thử nghiệm.



**Hình 1.** Thiết bị tạo sợi in 3D.

#### 2.2.3. Các phương pháp đánh giá

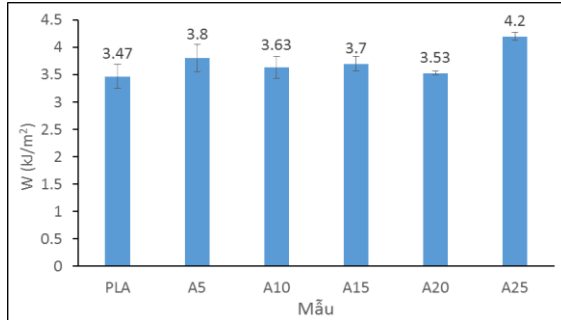
Tính chất cơ lý của mẫu vật liệu được đánh giá bằng thiết bị đo cơ lý vạn năng Yang Yi (Đài Loan), dựa trên các tiêu chuẩn thử nghiệm quốc tế, bao gồm độ bền uốn (ASTM D790), độ bền kéo (ASTM D638) và độ bền va đập (ISO 179). Chỉ số chảy của nhựa (Melt Flow Index, MFI) được đo lường theo tiêu chuẩn ASTM D1238 với các thông số vận hành là nhiệt độ 190°C và tải trọng 2,16 kg, sử dụng thiết bị đo MFR INTRON (Trung Quốc). Hình thái bề mặt của mẫu được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) Hitachi S4800, hoạt động ở điện thế 10 kV. Tính chất nhiệt của vật liệu được phân tích thông qua phương pháp phân tích nhiệt vi sai (DSC), thực hiện trên thiết bị DSC NETZSCH DSC 214

Polyma (Đức), và phương pháp phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) bằng thiết bị TGA Mettler Toledo (Thụy Sĩ).

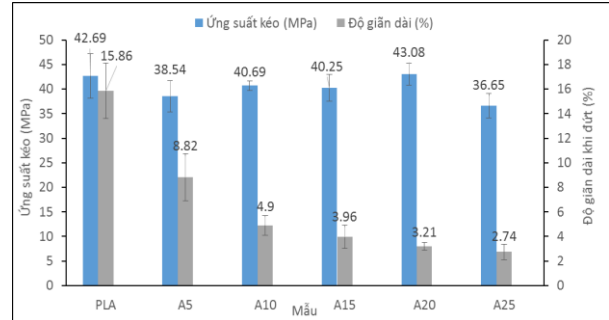
### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Khảo sát tính chất cơ lý của hỗn hợp vật liệu composite PLA/Talc ở các tỷ lệ khác nhau

##### 3.1.1. Độ bền và đập của hỗn hợp vật liệu PLA/Talc ở các tỷ lệ



**Hình 2.** Đồ thị biểu diễn độ bền và đập của các mẫu PLA/Talc.

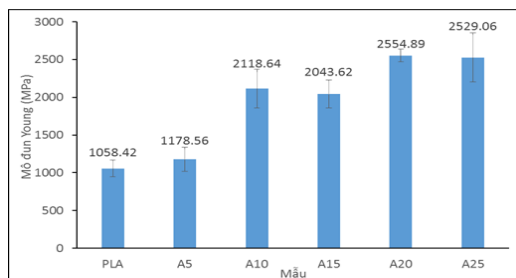


**Hình 3.** Độ bền kéo và độ giãn dài khi đứt của các mẫu PLA/Talc.

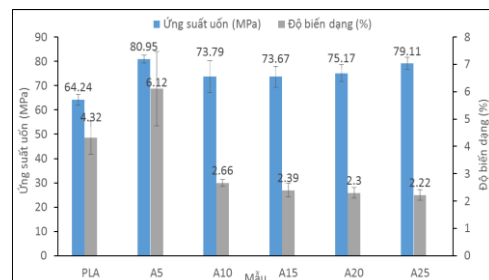
Kết quả khảo sát độ bền và đập của các mẫu composite PLA/Talc thể hiện trong Hình 2 cho thấy việc bổ sung thành phần Talc vào nhựa PLA có khả năng cải thiện đáng kể tính chất cơ lý của vật liệu so với PLA nguyên sinh. Cụ thể, mẫu PLA nguyên sinh (PLA trắng) đạt giá trị độ bền và đập thấp nhất là 3.47 kJ/m<sup>2</sup>, trong khi các mẫu composite PLA/Talc đều thể hiện giá trị cải thiện. Đáng chú ý, mẫu composite chứa 25%wt Talc (A25) đạt giá trị độ bền và đập cao nhất là 4.2 kJ/m<sup>2</sup>, vượt trội so với các tỷ lệ khác có thể do ở tỷ lệ này, sự phân tán và sắp xếp của các hạt talc tạo điều kiện phân tán năng lượng hiệu quả hơn thông qua cơ chế ma sát và lệch hướng vết nứt. Điều này chứng tỏ rằng tỷ lệ pha trộn hợp lý của Talc không chỉ tăng cường độ bền và đập mà còn tối ưu hóa tính chất cơ học tổng thể của composite. Những kết quả này nhấn mạnh tiềm năng của Talc như một chất gia cường hiệu quả trong việc cải thiện các đặc tính cơ lý của vật liệu composite PLA, đặc biệt là cho các ứng dụng kỹ thuật yêu cầu độ bền cao.

##### 3.1.2. Độ bền kéo của hỗn hợp vật liệu PLA/Talc ở các tỷ lệ

Kết quả đo cơ lý kéo trong Hình 3 cho thấy sự hiện diện của bột Talc không cải thiện đáng kể độ bền kéo của vật liệu composite PLA/Talc. Đồng thời, việc bổ sung Talc làm suy giảm rõ rệt khả năng biến dạng kéo của mẫu. Cụ thể, độ giãn dài khi đứt của vật liệu giảm mạnh từ 15,86% đối với PLA nguyên sinh xuống chỉ còn 2,74% với mẫu chứa 25% Talc. Hiện tượng này được giải thích do PLA/Talc trở nên giòn hơn khi hàm lượng Talc tăng, nguyên nhân xuất phát từ sự tách pha trong vật liệu composite. Talc không chỉ làm cản trở chuyển động của chuỗi phân tử PLA và gây giòn cho polymer nền, dẫn đến sự suy giảm độ giãn dài khi đứt. Tương tác liên diện pha kém và khả năng phân tán không đồng đều của Talc trong nền PLA là yếu tố chính được nhìn nhận, phù hợp với các kết quả đã được báo cáo trong các báo cáo trước đó [6-7].



**Hình 4.** Đồ thị biểu diễn Mô đun Young của các mẫu PLA/Talc.



**Hình 5.** Độ bền uốn và độ biến dạng của các mẫu PLA/Talc.

Kết quả khảo sát Mô đun Young (Young's modulus) được biểu diễn trong Hình 4 cho thấy rằng việc bổ sung thành phần Talc ở các tỷ lệ khác nhau đã làm tăng đáng kể độ cứng của vật liệu composite PLA/Talc. Đặc biệt, mẫu chứa 20%wt Talc (PLA/20Talc) đạt giá trị Mô đun Young cao nhất là 2554,89 MPa, gấp khoảng 2,5 lần so với PLA nguyên sinh (1058,42 MPa). Sự gia tăng này có thể được lý giải do cấu trúc khoáng cứng dạng phiến của Talc, giúp hạn chế chuyển động của chuỗi polymer khi chịu lực kéo, từ đó làm tăng độ cứng của vật liệu composite. Kết quả này nhất quán với nghiên cứu của Lee và cộng sự [8], khi mô đun Young của vật liệu tăng lên cùng với hàm lượng Talc cao hơn, nhấn mạnh vai trò quan trọng của Talc trong việc chuyển tải ứng suất hiệu quả và cải thiện độ cứng tổng thể của vật liệu.

### 3.1.3. Độ bền uốn của hỗn hợp vật liệu PLA/Talc ở các tỷ lệ

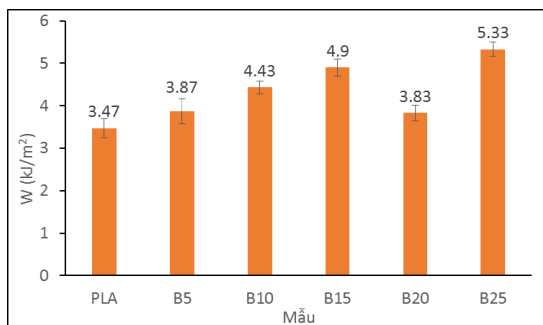
Kết quả khảo sát độ bền uốn được trình bày trong Hình 5 cho thấy rằng việc bổ sung Talc vào PLA giúp cải thiện đáng kể đặc tính này của vật liệu. Composite chứa 5% Talc (PLA/5Talc) đạt giá trị độ bền uốn cao nhất là **80,95 MPa**, tiếp theo là composite chứa 25% Talc (PLA/25Talc) với **79,11 MPa**. So với PLA nguyên sinh (64,24 MPa), cả hai mẫu này đều cho thấy sự gia tăng rõ rệt. Trong khi đó, các mẫu chứa từ 10% đến 20% Talc không có sự khác biệt lớn về độ bền uốn, với giá trị dao động từ **73,67 MPa đến 75,17 MPa**. Sự cải thiện này được giải thích dựa trên đặc tính cứng chắc của Talc, giúp tăng cường khả năng chịu ứng suất của vật liệu composite. Những kết quả trên nhất quán với luận điểm rằng việc bổ sung Talc ở các tỷ lệ phù hợp không chỉ nâng cao độ bền uốn mà còn góp phần tối ưu hóa tính chất cơ học tổng thể của vật liệu.

## 3.2. Khảo sát sự ảnh hưởng của phụ gia trợ tương hợp PLA-g-MAH lên các tính chất cơ lý của hỗn hợp vật liệu composite PLA/Talc

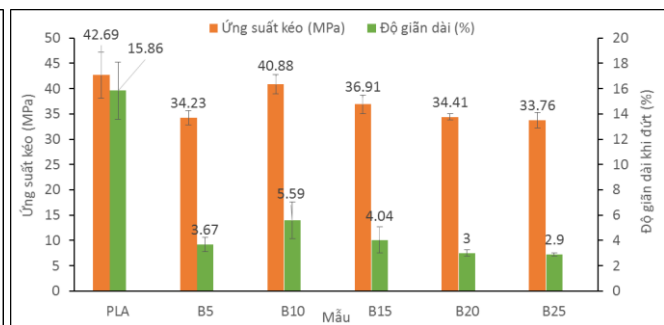
### 3.2.1. Độ bền và đập của các mẫu composite

**Bảng 1.** So sánh độ bền và đập  $\text{kJ/m}^2$  của hỗn hợp PLA/Talc và PLA/Talc/PLA-g-MAH các tỷ lệ.

Mẫu	Điều kiện	
	Không có PLA-g-MAH	Có PLA-g-MAH
PLA	3,47 ± 0,22	
PLA/5Talc	3,8 ± 0,25	3,87 ± 0,29
PLA/10Talc	3,63 ± 0,2	4,43 ± 0,15
PLA/15Talc	3,7 ± 0,13	4,90 ± 0,2
PLA/20Talc	3,53 ± 0,04	3,83 ± 0,18
PLA/25Talc	4,2 ± 0,07	5,33 ± 0,17



**Hình 6.** Độ bền và đập của các mẫu PLA/Talc/PLA-g-MAH.



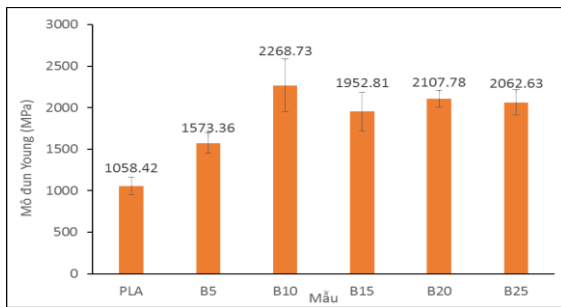
**Hình 7.** Độ bền kéo và độ giãn dài khi đứt của các mẫu composite PLA/Talc/PLA-g-MAH.

Kết quả khảo sát được trình bày trong Hình 6 cho thấy, việc bổ sung chất phụ gia trợ tương hợp đóng vai trò rất quan trọng trong việc cải thiện độ bền và đập của các mẫu composite PLA/Talc/PLA-g-MAH. Sự có mặt của chất trợ tương hợp đã tăng cường liên kết giữa hai pha Talc và PLA, dẫn đến sự gia tăng đáng kể độ bền và đập của vật liệu so với mẫu PLA nguyên sinh và các mẫu composite không chứa chất trợ tương hợp. Cụ thể, giá trị độ bền và đập tăng dần theo hàm lượng Talc, từ **3.87 kJ/m<sup>2</sup>** (B5) đến **4.43 kJ/m<sup>2</sup>** (B10), **4.9 kJ/m<sup>2</sup>** (B15) và đạt giá trị cao nhất là **5.33 kJ/m<sup>2</sup>** (B25). Những kết quả này nhấn mạnh vai trò của chất trợ tương hợp trong việc cải thiện sự liên kết pha, từ đó tăng khả năng chịu tác động và tối ưu hóa tính chất cơ học của vật liệu composite.

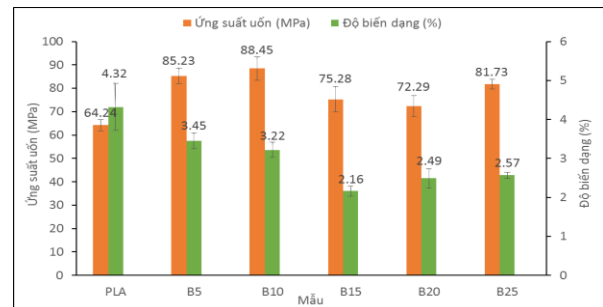
Quan sát Bảng 1 cho thấy độ bền và đập được cải thiện đáng kể và cho thấy vai trò cụ thể của chất trợ tương hợp giúp tăng cường khả năng liên kết giữa 2 pha PLA và Talc.

### 3.2.2. Độ bền kéo

Việc bổ sung thành phần trợ tương hợp PLA-g-MAH vào composite PLA/Talc không ảnh hưởng đáng kể đến xu hướng biến thiên tính chất cơ lý của vật liệu khi thay đổi hàm lượng Talc, như được thể hiện trong Hình 7. Đặc biệt, độ biến dạng kéo (độ giãn dài khi đứt) của composite PLA/Talc/PLA-g-MAH vẫn giảm khi tăng hàm lượng Talc, tương tự như kết quả quan sát được ở hệ composite PLA/Talc không chứa chất trợ tương hợp. Cụ thể, giá trị độ giãn dài khi đứt giảm từ 15,86% (PLA nguyên sinh) xuống còn 2,9% ở mẫu chứa 25% Talc. Xu hướng này cho thấy các hạt Talc tiếp tục đóng vai trò hạn chế chuyển động của chuỗi polymer, làm giảm độ dẻo dai và tăng tính giòn của vật liệu composite. Những kết quả này khẳng định rằng sự biến thiên tính chất cơ lý của composite chủ yếu do ảnh hưởng của hàm lượng Talc, trong khi sự hiện diện của chất trợ tương hợp không thay đổi xu hướng chung của tính chất cơ học, như các kết quả được thể hiện trong Bảng 2.



**Hình 8.** Đồ thị biểu diễn mô đun Young của các mẫu PLA/Talc/PLA-g-MAH.



**Hình 9.** Độ bền uốn và độ biến dạng của các mẫu PLA/Talc/PLA-g-MAH.

**Bảng 2.** Bảng so sánh độ bền kéo (MPa) của hỗn hợp PLA/Talc và PLA/Talc/PLA-g-MAH các tỷ lệ.

Mẫu	Điều kiện	
	Không có PLA-g-MAH	Có PLA-g-MAH
PLA	42,69 ± 4,55	
PLA/5Talc	38,54 ± 3,21	34,23 ± 1,45
PLA/10Talc	40,69 ± 1,01	40,88 ± 1,86
PLA/15Talc	40,25 ± 2,68	36,91 ± 1,88
PLA/20Talc	43,08 ± 2,25	34,41 ± 0,61
PLA/25Talc	36,65 ± 2,47	33,76 ± 1,5

Kết quả biểu đồ Hình 8 cho thấy giá trị mô đun đàn hồi của các mẫu composite PLA/Talc được cải thiện đáng kể khi tăng hàm lượng Talc (5–25%wt) và so với PLA nguyên sinh (1058,42 MPa). Đặc biệt, mẫu chứa 20% Talc (PLA/20Talc) đạt giá trị mô đun cao nhất là **2107,78 MPa**, gấp gần hai lần so với

PLA nguyên sinh. Khi so sánh giữa các mẫu composite cùng tỷ lệ Talc, việc sử dụng chất trợ tương hợp PLA-g-MAH giúp cải thiện giá trị mô đun đàn hồi, nhưng sự khác biệt không lớn và nằm trong phạm vi sai số, cho thấy tác động của trợ tương hợp đến tính chất này còn hạn chế. Nhìn chung, cả hai loại composite PLA/Talc và PLA/Talc/PLA-g-MAH đều cho giá trị mô đun đàn hồi cao hơn PLA nguyên sinh, khẳng định vai trò của Talc trong việc cải thiện tính cứng và đặc tính cơ học của vật liệu composite.

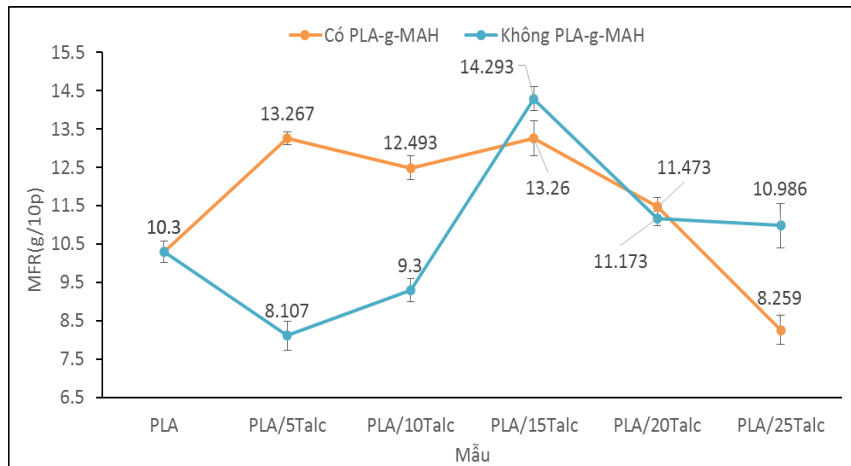
### 3.2.3. Độ bền uốn

Hình 9 cho thấy rằng sự có mặt của chất trợ tương hợp PLA-g-MAH giúp cải thiện độ bền uốn của composite PLA/Talc so với các mẫu không chứa chất trợ tương hợp. Sự phân tán tốt của hạt Talc trong nền PLA nhờ chất trợ tương hợp đã làm vật liệu trở nên đồng nhất hơn, từ đó gia tăng khả năng chịu ứng suất. Mẫu PLA/10Talc đạt giá trị độ bền uốn cao nhất với **88,45 MPa**, chứng minh sự tối ưu trong sự tương hợp và phân tán. Trong khi đó, mẫu chứa 25% Talc (PLA/25Talc) tiếp tục cho giá trị độ bền uốn cao (**81,73 MPa**), nhỉnh hơn so với các mẫu chứa 15% và 20% Talc (PLA/15Talc và PLA/20Talc). Tuy nhiên, sự chênh lệch giữa các giá trị không rõ ràng được thể hiện trong Bảng 3, do nằm trùng trong vùng sai số của phép đo, cũng như điều kiện gia công và thử nghiệm mẫu còn hạn chế. Nhìn chung, sự cải thiện độ bền uốn này khẳng định vai trò quan trọng của chất trợ tương hợp PLA-g-MAH trong việc tăng cường tính chất cơ học của vật liệu composite.

**Bảng 3.** Bảng so sánh độ bền uốn (MPa) của hỗn hợp PLA/Talc và PLA/Talc/PLA-g-MAH các tỷ lệ.

Mẫu	Điều kiện	Không có PLA-g-MAH	Có PLA-g-MAH
PLA		64,24 ± 2,36	
PLA/5Talc		80,95 ± 1,71	85,23 ± 3,37
PLA/10Talc		73,79 ± 6,59	88,45 ± 5,02
PLA/15Talc		73,67 ± 4,42	75,28 ± 5,49
PLA/20Talc		75,17 ± 3,49	72,29 ± 4,47
PLA/25Talc		79,11 ± 2,48	81,73 ± 2,1

### 3.3. Khảo sát đặc tính chảy của hỗn hợp PLA/Talc và PLA/Talc/PLA-g-MAH ở các tỷ lệ khác nhau

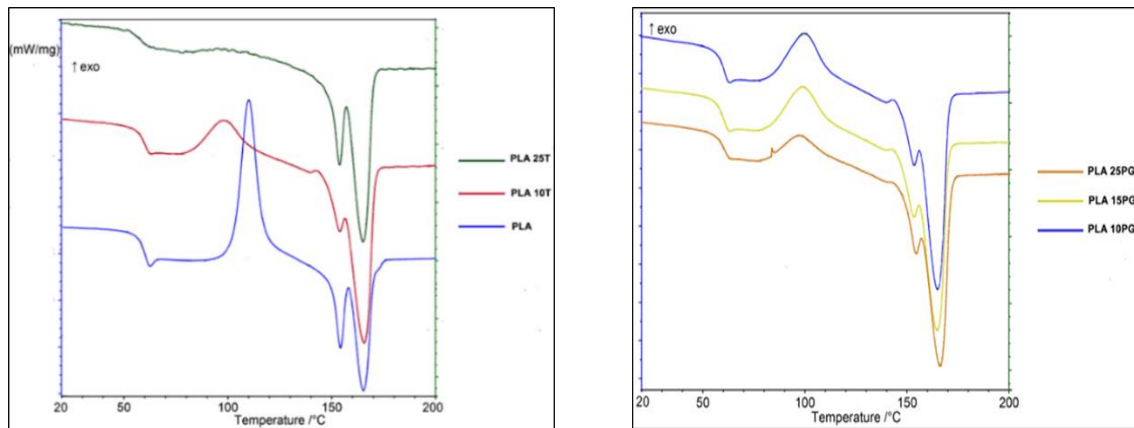


**Hình 10.** Đồ thị chỉ số chảy của hỗn hợp PLA/Talc và PLA/Talc/PLA-g-MAH các tỷ lệ.

Kết quả Hình 10 cho thấy ảnh hưởng của thành phần Talc đến khả năng gia công của vật liệu được đánh giá qua đặc tính dòng chảy (MFR). Việc bổ sung Talc vào PLA gây ra sự thay đổi đáng kể về chỉ số chảy của composite. Cụ thể, các mẫu **PLA/5Talc** và **PLA/10Talc** có giá trị MFR giảm so với PLA nguyên sinh, phản ánh sự suy giảm khả năng chảy do Talc cản trở chuyển động của chuỗi polymer. Tuy

nhiên, mẫu **PLA/15Talc** lại có giá trị MFR tăng, có thể do sự phân bố không đồng đều của Talc trong nền PLA. Đáng chú ý, các mẫu composite chứa 5–20% Talc kết hợp với phụ gia trợ tương hợp PLA-g-MAH có giá trị MFR cao hơn PLA nguyên sinh, chứng tỏ phụ gia trợ tương hợp đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng chảy của vật liệu. Phụ gia này giúp tăng cường sự tương thích giữa Talc và nền polymer, cải thiện sự phân tán hạt Talc và giảm lực cản trong quá trình chảy. Tuy nhiên, khi hàm lượng Talc tăng cao hơn (25%), chỉ số chảy của composite giảm, cho thấy sự cản trở từ các hạt Talc phân tán không đều và tính không đồng nhất trong vật liệu. Kết quả này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm soát hàm lượng và phân tán Talc để tối ưu hóa khả năng gia công của vật liệu composite, đặc biệt trong các ứng dụng như in 3D, nơi chỉ số chảy đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm.

### 3.3.1. Kết quả phân tích DSC



**Hình 11.** Đường cong DSC của các mẫu PLA, A10, A25.

Hình 11 và Bảng 4 trình bày phân tích DSC về các giá trị nhiệt quan trọng của PLA nguyên sinh và các mẫu composite PLA/Talc. Kết quả cho thấy rằng các hạt Talc không gây ảnh hưởng đáng kể đến quá trình chuyển hóa thủy tinh, với nhiệt độ  $T_g$  dao động từ **59-60°C** và có xu hướng tăng nhẹ khi thêm Talc. Tuy nhiên, nhiệt độ kết tinh nguội ( $T_c$ ) giảm mạnh từ **110,1°C** ở PLA nguyên sinh xuống **94,6°C** ở mẫu **A25**, do hạt Talc kích thước micro tạo ra các mầm không đồng nhất, thúc đẩy sự kết tinh ở nhiệt độ thấp hơn. Xu hướng này nhất quán với các kết quả đã được công bố trước đó [9], chỉ ra rằng hàm lượng Talc cao có thể làm giảm  $T_c$ .

Nhiệt độ nóng chảy ( $T_m$ ) của các mẫu gần giống với PLA nguyên sinh, với sự xuất hiện của hai đỉnh nóng chảy. Điều này có thể được lý giải do sự phối trộn của hai loại PLA khác nhau và sự ảnh hưởng của Talc lên cấu trúc nhựa. Ngoài ra, việc bổ sung chất trợ tương hợp như PLA-g-MAH giúp cải thiện sự phân tán và tương hợp giữa Talc và PLA, góp phần tăng cường độ kết tinh của vật liệu. Những kết quả này nhấn mạnh tác động đáng kể của Talc và phụ gia trợ tương hợp lên các đặc tính nhiệt của vật liệu composite PLA.

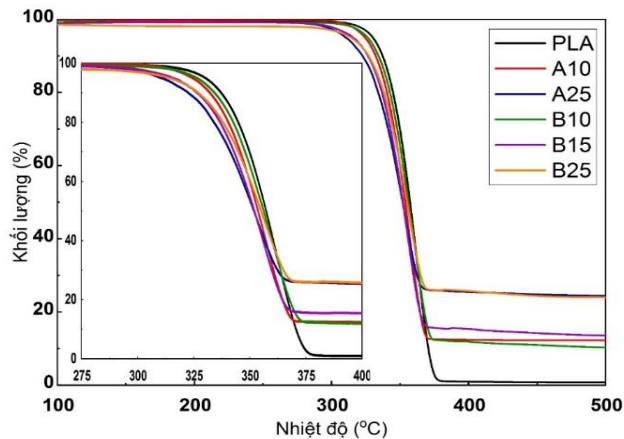
**Bảng 4.** Kết quả tính chất nhiệt của các mẫu.

Mẫu	$T_g$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2}$ (°C)	$\Delta H_c$ (J/g)	$\Delta H_m$ (J/g)
PLA	58,7	110,1	154,2	165,1	116,6	99,34
A10	59,7	98,1	153,9	165,7	34,19	96,14
A25	60,2	94,6	153,7	165,0	2,279	98,7
B10	59,3	99,9	153,4	164,7	39,56	90,69
B15	59,1	98,9	153,4	164,7	35,72	87,41
B25	59,8	96,9	154,5	166,2	22,32	82,54

### 3.3.2. Kết quả phân tích TGA

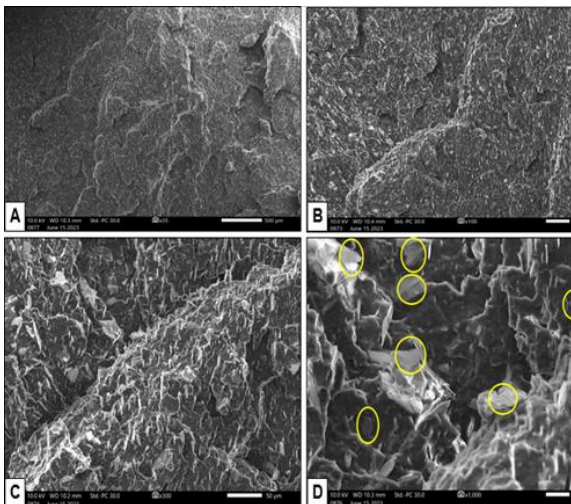
Giản đồ TGA được thể hiện trong Hình 12, giai đoạn đầu của phân tích TGA, tất cả các mẫu vật liệu đều ổn định ở nhiệt độ phòng. Khi nhiệt độ tăng từ 60–300°C, chỉ có PLA nguyên sinh giữ nguyên khối lượng, trong khi các mẫu composite PLA/Talc cho thấy sự giảm khối lượng. Nguyên nhân là do các hạt Talc chứa nước dưới dạng phức hợp hydrat trong cấu trúc, dẫn đến quá trình mất nước khi gia nhiệt đến nhiệt độ, như đã được chỉ ra trong nghiên cứu trước đó [10]. Ngược lại, PLA nguyên sinh không trải qua quá trình thoát hơi nước ở khoảng nhiệt độ này, do đó không bị giảm khối lượng. Theo đường cong TGA, nhiệt độ phân hủy của vật liệu xếp theo thứ tự từ thấp đến cao là A25, B25, B15, A10, B10, và cuối cùng là PLA nguyên sinh. Việc bổ sung Talc làm giảm khả năng chịu nhiệt của PLA, khiến phân hủy xảy ra ở nhiệt độ thấp hơn khi hàm lượng Talc tăng. Theo một nghiên cứu trước đó cho rằng sự giảm này là do hiện tượng tụ lại và phân tán kém của Talc, dẫn đến khoảng trống giữa hạt Talc và nền PLA, tăng khả năng khuếch tán oxy và sản phẩm phân hủy bay hơi.[11]

Tuy nhiên, với sự bổ sung chất trợ tương hợp PLA-g-MAH, độ bền nhiệt và khả năng kháng oxy hóa của composite được cải thiện. Khối lượng phân hủy giảm khi hàm lượng Talc tăng, nhưng ở các mẫu có PLA-g-MAH, sự giảm khối lượng này không thay đổi đáng kể, cho thấy tác động tích cực của chất trợ tương hợp trong việc ổn định cấu trúc vật liệu. Đặc biệt, PLA nguyên sinh gần như bị phân hủy hoàn toàn, kết quả này cũng được ghi nhận tương tự trong nghiên cứu trước đó. [6]

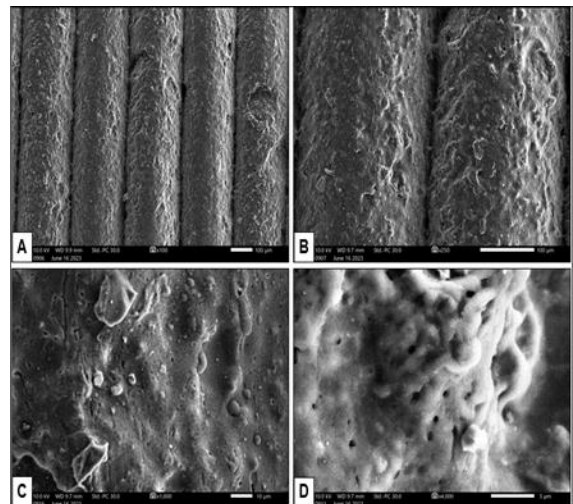


**Hình 12.** Đường cong TGA của PLA và các mẫu composite khảo sát.

### 3.3.3. Kết quả phân tích hình thái ảnh SEM



**Hình 13.** Ảnh SEM bề mặt đứt gãy và đập của PLA/10Talc/PLA-g-MAH ở các độ phóng đại khác nhau.



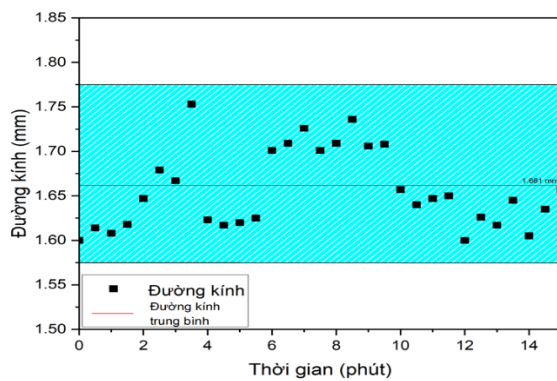
**Hình 14.** Ảnh SEM của mẫu in 3D PLA/10Talc/PLA-g-MAH ở các độ phóng đại khác nhau.

Hình thái bề mặt đứt gãy do va đập của mẫu PLA/10Talc/PLA-g-MAH đã được nghiên cứu bằng SEM nhằm phân tích cơ chế làm cứng và sự phân tán của Talc trong nền PLA. Qua quan sát Hình 13 và Hình 14 cho thấy các phiến Talc được phân bố khá đồng đều trên nền polymer nhờ sự hỗ trợ của chất trợ tương hợp PLA-g-MAH, giúp cải thiện tính đồng nhất của vật liệu và hạn chế sự kết tụ của các hạt Talc.

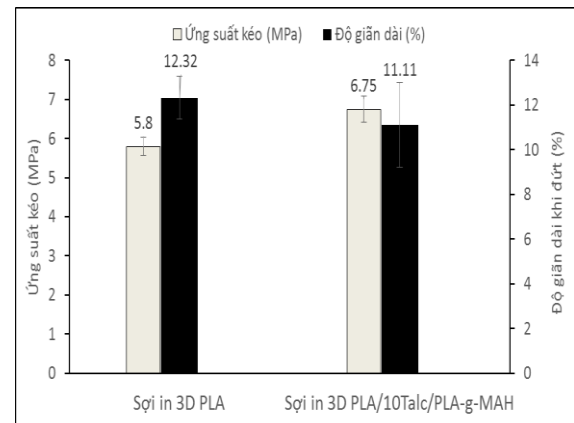
Việc bổ sung Talc làm cho bề mặt đứt gãy vốn nhẵn và mang tính giòn cao của PLA trở nên thô hơn, từ đó tăng cường đáng kể độ cứng của composite. Ảnh SEM của mẫu in 3D PLA/10Talc/PLA-g-MAH cho thấy các hạt Talc phân tán đều trên nền PLA, trong khi các lớp sợi in có cấu trúc rõ ràng và khá ổn định. Tuy nhiên, bề mặt in vẫn tương đối gồ ghề, sự xuất hiện của các vết nứt trên sợi in chỉ ra rằng quá trình chảy của vật liệu trong in 3D chưa hoàn toàn được tối ưu, ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm sau in.

Ở độ phóng đại cao hơn, các khoảng trống được quan sát trong nền PLA gợi ý về sự tương hợp chưa hoàn thiện giữa Talc và PLA, như đã nêu trong phân tích TGA [11]. Những khoảng trống này có thể gây ra sự phá hủy sớm của composite. Do đó, mặc dù hỗn hợp nóng chảy tạo ra sự phân bố tốt của Talc trong nền PLA, việc cải thiện tính tương hợp và khả năng chảy vẫn cần được quan tâm nhằm nâng cao các đặc tính cơ học của vật liệu [12].

### 3.4. Khảo sát quá trình tạo sợi in 3D bằng máy kéo sợi



**Hình 15.** Đồ thị dao động của đường kính sợi in 3D được chế tạo từ hỗn hợp PLA/10Talc/PLA-g-MAH theo thời gian.



**Hình 16.** Độ bền kéo và độ giãn dài khi đứt của sợi in 3D PLA và PLA/10Talc/PLA-g-MAH.

Khảo sát quá trình tạo sợi in 3D bằng thiết bị kéo sợi được thực hiện nhằm đánh giá khả năng kiểm soát và ổn định kích thước sợi trong quá trình gia công. Sợi in 3D được gia công bằng thiết bị đùn một trục vít với đường kính mục tiêu là 1.70 mm. Kết quả phân bố đường kính sợi theo thời gian, được trình bày trong hình đồ thị Hình 15, cho thấy sợi in được kiểm soát ổn định với giá trị đường kính trung bình đạt **1.661 mm**. Độ ổn định này đảm bảo rằng kích thước sợi phù hợp với các yêu cầu của quá trình in ấn 3D bằng phương pháp bồi đắp lớp. Sự sai lệch nhỏ so với đường kính mục tiêu nằm trong khoảng cho phép và không ảnh hưởng đến hiệu suất gia công, qua đó khẳng định tính khả dụng và chất lượng của sợi in trong ứng dụng thực tế [13].

### 3.5. Khảo sát tính chất cơ lý của PLA nguyên sinh và hỗn hợp PLA/10Talc/PLA-g-MAH sau khi kéo sợi in 3D

Phân tích kết quả từ Hình 16 cho thấy sợi in 3D PLA/10Talc/PLA-g-MAH có độ bền kéo cao hơn so với sợi in 3D PLA, đạt giá trị **6.75 MPa**, so với **5.8 MPa** của sợi PLA. Đặc biệt, độ giãn dài khi đứt của sợi composite (**11.11%**) gần như tương đương với sợi PLA (**12.32%**). Kết quả này trái ngược với phân tích độ bền kéo theo tiêu chuẩn ASTM D882 trước đó, do ảnh hưởng của quá trình kéo sợi trong in 3D đến tính chất vật liệu. Sợi PLA suy giảm độ bền kéo nhiều hơn trong quá trình kéo sợi do chỉ số chảy thấp hơn so với sợi composite. Chỉ số chảy (MFR) được xác định là yếu tố quan trọng trong quá

trình kéo sợi để in 3D, ảnh hưởng đến khả năng định hình và ổn định kích thước của sợi in. Mẫu composite với sự hiện diện của chất trợ tương hợp PLA-g-MAH đã cải thiện đáng kể khả năng chảy, dẫn đến sợi in có độ ổn định và chất lượng vượt trội hơn [14].

Ngoài ra, Hình 16 cũng cho thấy mô đun Young của sợi in 3D PLA/10Talc/PLA-g-MAH cao hơn khoảng 3 lần so với sợi PLA, nhấn mạnh vai trò của Talc trong việc tăng độ đặc khít và độ cứng cấu trúc của vật liệu. Sự phân tán tốt của thành phần Talc trong nền PLA đã góp phần quan trọng vào việc cải thiện các tính chất cơ học, đồng thời phù hợp với các kết quả phân tích trước đó về độ bền kéo. Những kết quả này khẳng định rằng việc bổ sung Talc và chất trợ tương hợp không chỉ cải thiện khả năng chảy mà còn gia tăng đáng kể độ bền và độ cứng của vật liệu composite [15].

#### 4. Kết luận

Đề tài đã nghiên cứu và chế tạo thành công vật liệu composite trên cơ sở PLA/Talc, ứng dụng trong công nghệ in 3D. Các thí nghiệm đã khảo sát và phân tích toàn diện các tính chất của vật liệu, bao gồm tính chất cơ lý (độ bền va đập, độ bền kéo, độ bền uốn), tính chất nhiệt (DSC, TGA), chỉ số chảy và hình thái bề mặt thông qua phân tích SEM. Kết quả cho thấy việc bổ sung Talc và chất trợ tương hợp PLA-g-MAH không chỉ cải thiện các đặc tính cơ học như độ bền kéo, độ bền va đập, độ cứng mà còn cải thiện khả năng chảy của vật liệu, đảm bảo tính đồng nhất trong quá trình gia công. Vật liệu composite tối ưu PLA/10Talc/PLA-g-MAH đã được sử dụng để kéo sợi in 3D và so sánh với sợi in 3D từ PLA nguyên sinh. Các kết quả cho thấy mẫu sợi composite có độ bền kéo và mô đun Young vượt trội, khả năng chảy ổn định, đồng thời giữ được độ giãn dài khi đứt gần tương đương với PLA nguyên sinh. Các cải tiến này không chỉ nhấn mạnh tiềm năng ứng dụng của composite PLA/Talc trong công nghệ in 3D mà còn đặt nền móng cho việc phát triển vật liệu thân thiện môi trường, hiệu quả và chất lượng cao.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu được thực hiện ở Phòng Thí nghiệm Cơ sở Khoa học Vật liệu thuộc Khoa Khoa học và Công nghệ Vật liệu, Trường Đại học Khoa học tự nhiên, Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh.

#### Xung đột lợi ích

Chúng tôi cam kết không có bất kỳ xung đột lợi ích nào giữa các thành viên trong nhóm nghiên cứu.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Karamanlioglu and Ü. Alkan, "Influence of degradation of PLA with high degree of crystallinity on fungal community structure in compost," *Compost Science & Utilization*, vol. 28, no. 3–4, pp. 169–178, 2020, doi: 10.1080/1065657X.2020.1864514.
- [2] E. Balla *et al.*, "Poly(lactic acid): A versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties—From monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to PLA applications," *Polymers*, vol. 13, no. 11, p. 1822, 2021, doi: 10.3390/polym13111822.
- [3] H. Li, M. A. Huneault, and H. Li, "Comparison of the crystallization behavior of PLA/talc composites," *Polymer Engineering & Science*, vol. 54, no. 7, pp. 1573–1580, 2014, doi: 10.1002/pen.23680.
- [4] M. Pluta, A. Galeski, M. Alexandre, M. A. Paul, and P. Dubois, "Polylactide/talc composites: morphology and mechanical properties," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 86, no. 6, pp. 1497–1506, 2002, doi: 10.1002/app.11121.
- [5] G. Gorrası and R. Pantani, "Effect of talc on the physical–mechanical properties and biodegradation of poly(lactic acid)," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 98, no. 4, pp. 1006–1014, 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.01.024.
- [6] A. Huang, P. Yu, X. Jing, H. Mi, L. Geng, B. Chen, and X. Peng, "The effect of talc on the mechanical, crystallization and foaming properties of poly(lactic acid)," *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, vol. 55, no. 9, pp. 908–924, 2016, doi: 10.1080/00222348.2016.1217186.
- [7] T. Khuenkeao, N. Petchwattana, and S. Covavisaruch, "Thermal and mechanical properties of bioplastic poly(lactic acid) compounded with silicone rubber and talc," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1713, 2016, doi: 10.1063/1.4942294.
- [8] C. Lee, M. Pang, S. Koay, H. Choo, and K. Tshai, "Talc-filled polylactic-acid biobased polymer composites: Tensile, thermal and morphological properties," *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2172-y.
- [9] S. Ham, "The investigation of PLA–talc composites in 3D printing," *University of Delaware*, pp. 15–17, 2020, doi: 10.1063/1.5045948.
- [10] S. Dikmen, B. Ersoy, and D. Dikmen, "Adsorption behaviour of ionic and non-ionic surfactants onto talc—a naturally hydrophobic mineral: A comparative study," *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*, vol. 21, pp. 139–152, 2020, doi: 10.18038/estubtda.829712.
- [11] A. Akbari, M. Jawaid, A. Hassan, and H. Balakrishnan, "Epoxidized natural rubber toughened polylactic acid/talc composites: Mechanical, thermal, and morphological properties," *Journal of Composite Materials*, vol. 48, no. 7, pp. 769–781, 2013, doi: 10.1177/0021998313477461.
- [12] X. Liu, T. Wang, L. Chow, M. Yang, and J. Mitchell, "Effects of inorganic fillers on the thermal and mechanical properties of poly(lactic acid)," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2014, Article ID 827028, 2014, doi: 10.1155/2014/827028.

- [13] K. Miparanum, B. Albar, and A. Abando, "Effects of functional fillers in the mechanical properties of 3D-printed polylactic acid deposition modelling: A literature review," *Ateneo de Davao University*, Davao City, 2022, doi: 10.14293/S2199-1006.1.SOR-PPJZTVP.v1.
- [14] S. Bhandari, R. A. Lopez-Anido, and D. J. Gardner, "Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing," *Additive Manufacturing*, vol. 30, p. 100922, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100922.
- [15] L. Zhang, S. Lv, C. Sun, L. Wan, H. Tan, and Y. Zhang, "Effect of MAH-g-PLA on the properties of wood fiber/polylactic acid composites," *Polymers*, vol. 9, no. 11, p. 591, 2017, doi: 10.3390/polym9110591.

**Thien Dinh Le** is a master student at Faculty of Materials Science and Technology, University of Science, VNU-HCM. He obtained the degree of bachelor of materials science from University Of Science (Vietnam).

Email: [23C91004@student.hcmus.edu.vn](mailto:23C91004@student.hcmus.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9120-1970>

**Tien Trung Vu** is a professional researcher at Faculty of Materials Science and Technology, University of Science, VNU-HCM. He obtained the degree of bachelor of materials science from University Of Science (Vietnam), graduated with the master of science in chemistry from University Of Science (Vietnam) and conducted professional research and development in academic and industrial organizations.

Email: [vttrung@hcmus.edu.vn](mailto:vttrung@hcmus.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2146-3883>

**Huy Lam Pham** is a lecturer at Faculty of Materials Science and Technology, University of Science, VNU-HCM. He obtained the master of science degree in chemistry from University of Science, VNU-HCM.

Email: [phtmlam@hcmus.edu.vn](mailto:phtmlam@hcmus.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4759-7778>

**Ngoc Thu Nguyen** received the bachelor of science degree in materials science from University of Science, VNU-HCM.

Email: [20190105@student.hcmus.edu.vn](mailto:20190105@student.hcmus.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6494-4353>

**Minh Thanh Le** is a master student at Faculty of Materials Science and Technology, University of Science, VNU-HCM. He obtained the degree of bachelor of materials science from University Of Science (Vietnam).

Email: [lethanh11us@gmail.com](mailto:lethanh11us@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3322-9402>

**Thanh Huy Le** received the bachelor of science degree in materials technology from University of Science, VNU-HCM.

Email: [21250012@student.hcmus.edu.vn](mailto:21250012@student.hcmus.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0982-6138>

**Chi Nhan Ha Thuc** is an associate professor and senior lecturer at Faculty of Materials Science and Technology, University of Science, VNU-HCM. He obtained the master of science degree from Université du Maine and the doctor of philosophy degree from Université Savoie Mont Blanc.

Email: [htcnhan@hcmus.edu.vn](mailto:htcnhan@hcmus.edu.vn). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7003-7456>