NGHIÊN CỨU ĐỘ BỀN CỦA VẬT LIỆU COMPOSITE

STUDY ON THE STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS

Vũ Quang Huy*, Nguyễn Trường Vũ, Lê Anh Huy, Chu Hoài Thanh
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: *huyvq@hcmute.edu.vn;*
20144496@student.hcmute.edu.vn;
20144402@student.hcmute.edu.vn;
20144457@student.hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng của hai loại phụ gia vô cơ là oxit kẽm (ZnO) và tro bay đến các đặc tính cơ học của vật liệu nền polyamide 6 (PA6) gia cường bằng 30% sợi thủy tinh. Các mẫu composite được chế tạo bằng phương pháp phun ép với các thông số gia công được tối ưu hóa theo phương pháp Taguchi. Đặc tính cơ học được đánh giá qua các phép thử kéo, uốn, đo độ cứng Shore D và phân tích hình thái học bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM). Kết quả cho thấy tro bay giúp cải thiện đáng kể độ bền kéo và uốn, trong khi ZnO làm tăng độ cứng nhưng ảnh hưởng tiêu cực đến độ bền kéo và độ dẻo dai. Phân tích dữ liệu bằng phần mềm Minitab xác định được các thông số ép tối ưu cho từng loại phụ gia. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc lựa chọn vật liệu composite phù hợp cho các ứng dụng kỹ thuật yêu cầu tính cơ học cao và thân thiện môi trường.

Từ khoá: *Composite; PA6; ZnO; Tro bay; Độ bền kéo; Độ bền uốn; Phun ép; Taguchi; SEM; Minitab.*

ABSTRACT

This study investigates the effects of two inorganic additives – zinc oxide (ZnO) and fly ash – on the mechanical properties of a polyamide 6 (PA6) matrix reinforced with 30% glass fiber. Composite samples were fabricated using the injection molding method, with processing parameters optimized via the Taguchi approach. Mechanical performance was evaluated through tensile and flexural tests, Shore D hardness measurements, and morphological analysis using scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that fly ash significantly enhances tensile and flexural strength, while ZnO increases hardness but negatively affects tensile strength and toughness. Statistical analysis using Minitab identified the optimal molding parameters for each type of additive. This study provides an experimental basis for selecting suitable composite materials for engineering applications requiring high mechanical performance and environmental sustainability.

Keywords: *Composite; PA6; ZnO; Fly ash; Tensile strength; Flexural strength; Injection molding; Taguchi; SEM; Minitab.*

1. TỔNG QUAN

1.1. Tổng quan vật liệu composite PA6 + 30%GF và phụ gia

Vật liệu composite trên nền nhựa nhiệt dẻo hiện nay đang được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật nhờ sự kết hợp hiệu quả giữa đặc tính dễ gia công của nhựa nền và độ bền cơ học cao của chất gia cường. Trong đó, polyamide 6 (PA6), hay còn gọi là Nylon 6, là một trong những polymer kỹ thuật phổ biến nhất do có sự cân bằng tốt giữa các tính chất cơ học, nhiệt và hóa học. Tuy nhiên, PA6 nguyên chất vẫn còn tồn tại một số hạn chế như khả năng chịu lực không cao, dễ biến dạng dưới tải trọng lớn và đặc biệt nhạy cảm với độ ẩm. Vì vậy, để cải thiện những nhược điểm này, việc gia cường bằng sợi thủy tinh (Glass Fiber – GF) trở thành một giải pháp hiệu quả [1].

Khi kết hợp PA6 với 30% sợi thủy tinh theo khối lượng, ta thu được vật liệu PA6 30GF – một dạng composite có tính chất cơ lý ưu việt hơn hẳn so với PA6 nguyên chất. Sợi thủy tinh trong hệ vật liệu này đóng vai trò như khung xương chịu lực, giúp tăng độ bền kéo, độ bền uốn, độ cứng và ổn định kích thước. Cấu trúc mạng sợi bên trong làm hạn chế biến dạng do tải trọng hoặc giãn nở do nhiệt, đồng thời làm giảm độ co ngót sau gia công, giúp sản phẩm có hình dạng chính xác và ít sai số kích thước hơn. Khả năng chịu va đập, chịu mài mòn cũng được cải thiện đáng kể, biến PA6 30GF thành vật liệu lý tưởng cho các chi tiết làm việc trong điều kiện cơ – nhiệt khắc nghiệt như vỏ hộp truyền động, cánh quạt, tay cầm, khung máy hoặc các chi tiết ô tô – điện tử kỹ thuật [1].

Tuy nhiên, để tiếp tục nâng cao hiệu suất sử dụng và phát triển sản phẩm theo hướng thân thiện với môi trường và kinh tế tuần hoàn, việc bổ sung thêm các phụ gia vô cơ vào vật liệu nền PA6 30GF là xu hướng nghiên cứu hiện đại. Trong đề tài này, hai loại phụ gia được lựa chọn là bột nano oxit kẽm (ZnO) và tro bay – đều là những vật liệu có tiềm năng ứng dụng cao và sẵn có [1].

Bột nano ZnO (ZnO NPS) là một vật liệu nano đa năng với kích thước hạt siêu nhỏ (20-60 nm), có cấu trúc tinh thể ổn định và khả năng tăng độ cứng cho polymer khi phân tán đều trong nền nhựa. ZnO còn có tính chất kháng khuẩn, chống tia UV, dẫn nhiệt tốt và giúp ổn định hình học cho sản phẩm. Tuy nhiên, do kích thước nano và xu hướng kết tụ, việc sử dụng ZnO hiệu quả phụ thuộc nhiều vào kỹ thuật xử lý bề mặt (như sử dụng phụ gia silane A1100) và quy trình phân tán đồng đều [2-5].

Tro bay là một loại phụ gia khoáng dạng bột, chủ yếu được sinh ra từ quá trình đốt than đá trong các nhà máy nhiệt điện. Thành phần chủ yếu của tro bay bao gồm các oxit như SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 và CaO. Đây là nguồn phụ phẩm công nghiệp khổng lồ, nếu không được xử lý hợp lý sẽ gây ô nhiễm môi trường. Trong lĩnh vực composite, tro bay được xem là chất độn giúp tăng cường độ bền, giảm tỷ trọng và giá thành sản phẩm. So với ZnO, tro bay có kích thước hạt lớn hơn (2-10 µm), nhưng khả năng bám dính với nền nhựa lại tốt hơn, nhất là khi được xử lý bằng chất liên kết bề mặt (coupling agent) [6-8].

Việc kết hợp PA6 30GF với ZnO hoặc tro bay không chỉ mở ra khả năng cải thiện cơ tính mà còn mang ý nghĩa lớn trong hướng tiếp cận phát triển vật liệu xanh, bền vững, tận dụng phế phẩm công nghiệp và giảm phụ thuộc vào nguyên liệu nhập khẩu giá cao. Bên cạnh đó, sự hỗ trợ của các công cụ hiện đại như thiết kế thí nghiệm theo phương pháp Taguchi, phân tích tối ưu thông số bằng phần mềm Minitab và kiểm chứng bằng thiết bị SEM càng làm cho ☞

nghiên cứu này trở nên toàn diện và mang tính ứng dụng cao [1].

1.2. Công nghệ ép phun và đo kiểm

Phương pháp ép phun được sử dụng để chế tạo các mẫu composite từ vật liệu PA6 gia cường 30% sợi thủy tinh kết hợp với phụ gia ZnO và tro bay. Quá trình ép được thực hiện trên máy HAITIAN MA1200 III với các thông số như áp suất phun, thời gian phun, áp suất giữ, thời gian giữ và nhiệt độ phun được thiết lập theo ma trận thực nghiệm Taguchi L25.

Sau khi chế tạo, các mẫu được kiểm tra cơ tính bằng phương pháp kéo (ASTM D638), uốn (ASTM D790) và đo độ cứng Shore D. Ngoài ra, bề mặt phá hủy của mẫu còn được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) nhằm đánh giá mức độ phân tán và liên kết của phụ gia trong nền nhựa. Các phép đo được lặp lại để đảm bảo độ tin cậy và được phân tích bằng phần mềm Minitab.

2. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

2.1. Chuẩn bị vật liệu và phối trộn

Quá trình chuẩn bị vật liệu trong nghiên cứu bao gồm việc xử lý bề mặt phụ gia bằng silane, phối trộn với hạt nhựa PA6 + 30% sợi thủy tinh và tạo hạt thông qua thiết bị đùn. Đầu tiên, dung dịch silane A1100 được pha chế theo tỷ lệ thích hợp và điều chỉnh pH bằng axit axetic nhằm thúc đẩy quá trình thủy phân, giúp silane hoạt hóa và tạo liên kết tốt hơn với bề mặt phụ gia. Tiếp theo, các phụ gia ZnO (0-3%) và tro bay (2,5-10%) được phối trộn với hạt nhựa PA6 + 30%GF. Trong lúc trộn, dung dịch silane được phun trực tiếp để tăng khả năng bám dính và phân tán đồng đều trong nền nhựa. Sau khi phối trộn, hỗn hợp được đưa vào máy đùn để tạo thành sợi composite, sau đó làm nguội bằng nước và băm thành hạt nhỏ phục vụ cho quá trình ép phun. Toàn bộ quá trình giúp đảm bảo sự đồng nhất của vật liệu, tăng khả năng tương thích giữa phụ gia và nền nhựa, từ đó cải thiện hiệu quả tính chất cơ học của sản phẩm composite (Bảng 1).

Bảng 1. Thông số tỉ lệ pha silane cho mỗi tỉ lệ phụ gia phun vào nhựa

Tỉ lệ ZnO / composite (%)	**Khối lượng ZnO (g)**	**Khối lượng silane (g)**	**Khối lượng nước (g)**	**Khối lượng ethanol (g)**
0	0	0	0	0
1	20	4	1.6	14.4
2	40	8	3.2	28.8
3	60	12	4.8	43.2
4	80	16	6.4	57.6
Tỉ lệ tro bay / composite (%)	**Khối lượng tro bay (g)**	**Khối lượng silane (g)**	**Khối lượng nước (g)**	**Khối lượng ethanol (g)**
0	0	0	0	0
2.5	50	10	4	36
5	100	20	8	72
7.5	150	30	12	108
10	200	40	16	144

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 336, tháng 12 năm 2025
cokhivietnam.vn

2.2. Ép mẫu và thiết lập thông số

Quá trình ép mẫu là một khâu quan trọng nhằm tạo ra các sản phẩm composite đạt yêu cầu hình học và tính chất cơ học để phục vụ cho các phép thử nghiệm kéo, uốn và độ cứng. Trong nghiên cứu này, phương pháp ép phun được thực hiện trên máy HAITIAN MA1200 III, một thiết bị ép nhựa hiện đại có khả năng điều khiển chính xác các thông số công nghệ như áp suất, nhiệt độ và thời gian.

(*) Mục tiêu thiết lập thông số ép

Nhằm xác định các thông số tối ưu ảnh hưởng đến chất lượng mẫu ép, nhóm nghiên cứu lựa chọn 5 yếu tố chính bao gồm (Bảng 2):

- Áp suất phun (bar);
- Thời gian phun (s);
- Áp suất giữ (bar);
- Thời gian giữ (s);
- Nhiệt độ đầu phun (°C).

Để đảm bảo độ tin cậy và bao quát toàn bộ dải giá trị khảo sát, mỗi thông số được chia thành 5 mức. Ban đầu, nhóm sử dụng nhựa PA6 + 30%GF chưa phối trộn phụ gia để tiến hành các thử nghiệm xác định mức thông số tối thiểu cần thiết để mẫu được ép đầy khuôn, không có bavia hay lỗ rỗng.

Bảng 2. Mức thông số thấp nhất

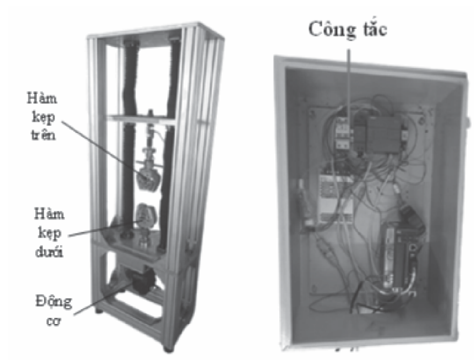
Thông số	Giá trị	Đơn vị
Áp suất phun	35	bar
Thời gian phun	3	s
Áp suất giữ	32	bar
Thời gian giữ	0	s
Nhiệt độ	270	°C

Sau khi có được mức thông số thấp nhất, ta sẽ tiến hành khảo sát bằng phương pháp Taguchi để tìm ra bộ thông số tối ưu nhất cho các mẫu ép.

3. THỰC NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

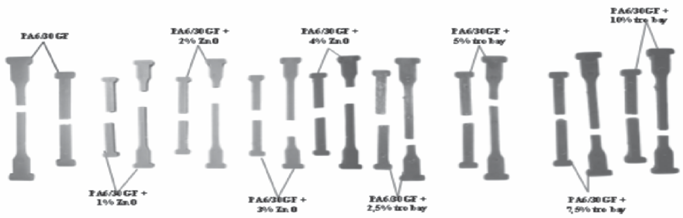
(*) Phương pháp đo độ bền

Tiến hành thí nghiệm đo độ bền của mẫu bằng máy kéo vạn năng thuộc Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh. Đánh giá, phân tích kết quả thực nghiệm bằng phần mềm Taguchi, ANOVA và hàm tỉ lệ Fmax/m để tìm thông số tối ưu cho hai loại phụ gia đang khảo sát (Hình 1, 2).



Hình 1. Máy đo độ bền kéo – uốn

Hình 2. Giao diện phần mềm SIMATIC WinCC Runtime Advanced



Hình 3. Mẫu sau khi đo độ bền kéo – uốn

(*) Kết quả độ bền kéo – uốn của mẫu composite với chất độn (Hình 3) như Bảng 3.

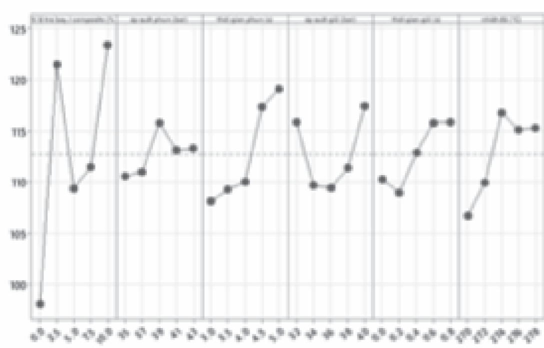
Bảng 3. Độ bền kéo – uốn của từng loại composite với chất độn là ZnO

STT	Composite	Áp suất phun (bar)	Thời gian phun (s)	Áp suất giữ (bar)	Thời gian giữ (s)	Nhiệt độ (°C)	Độ bền kéo (Mpa)	Độ bền uốn (Mpa)
1	PA6+30% GF	35	3	32	0	270	85.88	154.05
2		37	3.5	34	0.2	272	83.12	142.89
3		39	4	36	0.4	274	99.23	140.67
4		41	4.5	38	0.6	276	107.09	158.53
5		43	5	40	0.8	278	115.34	167.48
6	PA6+ 30% GF + 1% ZnO	35	3.5	36	0.6	278	131.44	164.95
7		37	4	38	0.8	270	110.15	128.64
8		39	4.5	40	0	272	80.45	121.95
9		41	5	32	0.2	274	99.00	126.43
10		43	3	34	0.4	276	93.89	123.08
11	PA6+ 30% GF + 2% ZnO	35	4	40	0.2	276	101.69	123.26
12		37	4.5	32	0.4	278	120.68	130.90
13		39	5	34	0.6	270	115.26	133.12
14		41	3	36	0.8	272	101.90	127.51
15		43	3.5	38	0	274	103.24	134.25
16	PA6+ 30% GF + 3% ZnO	35	4.5	34	0.8	274	51.07	127.51
17		37	5	36	0	276	45.45	127.51
18		39	3	38	0.2	278	36.05	128.64
19		41	3.5	40	0.4	270	49.38	96.13
20		43	4	32	0.6	272	43.43	75.60
21	PA6+ 30% GF + 4% ZnO	35	5	38	0.4	272	55.18	73.98
22		37	3	40	0.6	274	41.70	96.27
23		39	3.5	32	0.8	276	54.09	129.37
24		41	4	34	0	278	52.91	145.15
25		43	4.5	36	0.2	270	54.64	128.24

(*) Kết quả độ bền kéo tối ưu thu được cho chất phụ gia Tro bay (Hình 4, 5) là:

Level	tỉ lệ tro bay / composite (%	áp suất phun (bar)	thời gian phun (s)	áp suất giữ (bar)	thời gian giữ (s)	nhiệt độ (°C)
1	39.77	40.80	40.60	41.18	40.77	40.52
2	41.67	40.82	40.67	40.73	40.65	40.72
3	40.77	41.23	40.82	40.76	41.03	41.30
4	40.94	41.03	41.38	40.92	41.26	41.20
5	41.81	41.08	41.50	41.37	41.25	41.23
Delta	2.05	0.42	0.90	0.64	0.61	0.78
Rank	1	6	2	4	5	3

Hình 4. Dữ liệu phân tích mức độ ảnh hưởng của từng biến đến độ bền kéo của sản phẩm bằng phần mềm Minitab



Hình 5. Dữ liệu phân tích mức độ ảnh hưởng của từng giá trị của mỗi biến đến độ bền kéo của sản phẩm bằng phần mềm Minitab

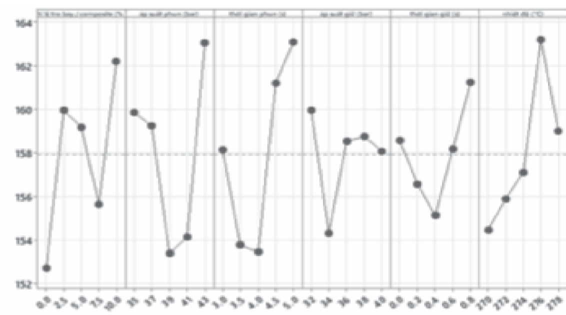
Từ hai kết quả phân tích trên, ta thu được bộ thông số tối ưu như sau:

- Tỉ lệ tro bay/composite: 10 (%);
- Áp suất phun: 43 (bar);
- Thời gian phun: 5 (s);
- Áp suất giữ: 40 (bar);
- Thời gian giữ: 0.8 (s);
- Nhiệt độ: 278 (°C).

(*) Kết quả độ bền uốn tối ưu thu được cho chất phụ gia Tro bay như Hình 6 và 7:

Level	tỉ lệ tro bay / composite (%	áp suất phun (bar)	thời gian phun (s)	áp suất giữ (bar)	thời gian giữ (s)	nhiệt độ (°C)
1	43.66	44.07	43.98	44.08	44.00	43.77
2	44.08	44.03	43.72	43.76	43.88	43.85
3	44.04	43.71	43.71	43.99	43.79	43.91
4	43.83	43.75	44.15	44.01	43.98	44.25
5	44.20	44.24	44.24	43.96	44.15	44.02
Delta	0.54	0.54	0.53	0.32	0.36	0.49
Rank	2	1	3	6	5	4

Hình 6. Dữ liệu phân tích mức độ ảnh hưởng của từng biến đến độ bền uốn của sản phẩm bằng phần mềm Minitab



Hình 7. Dữ liệu phân tích mức độ ảnh hưởng của từng giá trị của biến đến độ bền uốn của sản phẩm bằng phần mềm Minitab

Từ hai kết quả phân tích trên, ta thu được bộ thông số tối ưu như sau [3], [4], [5], [11], [12]:

- Tỉ lệ tro bay/composite: 10 (%);
- Áp suất phun: 43 (bar);
- Thời gian phun: 5 (s);
- Áp suất giữ: 40 (bar);
- Thời gian giữ: 0.8 (s);
- Nhiệt độ: 278 (°C).

Kết quả đo độ bền kéo – uốn của các mẫu composite chứa ZnO cho thấy xu hướng suy giảm rõ rệt khi hàm lượng ZnO tăng. Tại tỉ lệ 1% ZnO, độ bền kéo và độ bền uốn đạt giá trị cao nhất (131.4 MPa và 164.95 MPa), tuy nhiên từ 2% trở lên bắt đầu giảm nhanh, và ở mức 4% ZnO, các chỉ tiêu cơ học thấp hơn cả mẫu gốc. Điều này chứng tỏ khả năng phân tán và tương tác của ZnO với nền nhựa có giới hạn, việc sử dụng quá mức dẫn đến hiện tượng kết tụ và phá vỡ cấu trúc vật liệu.

Các mẫu chứa tro bay có xu hướng tăng dần độ bền kéo và uốn theo hàm lượng. Mẫu chứa 10% tro bay đạt độ bền kéo 131.44 MPa và độ bền uốn 171.05 MPa, tăng lần lượt 25.8% và 10.3% so với mẫu PA6/30GF gốc. Điều này cho thấy tro bay có hiệu quả gia cường tốt hơn ZnO trong hệ composite nghiên cứu. Ngoài ra, việc tận dụng tro bay còn mang lại lợi ích kinh tế và môi trường đáng kể [1].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã khảo sát ảnh hưởng của hai loại phụ gia vô cơ – ZnO và tro bay – đến tính chất cơ học của vật liệu composite nền PA6 gia cường 30% sợi thủy tinh, thông qua quá trình ép phun và tối ưu hóa bằng phương pháp Taguchi. Kết quả cho thấy, việc bổ sung tro bay giúp cải thiện đáng kể độ bền kéo và độ bền uốn, đặc biệt ở tỷ lệ 10%. Trong khi đó, ZnO chỉ hiệu quả ở tỷ lệ thấp (~1%), còn nếu vượt quá mức này sẽ làm giảm cơ tính do hiện tượng kết tụ hạt.

Độ cứng bề mặt tăng lên ở cả hai loại phụ gia, trong đó ZnO giúp tăng độ cứng nhiều hơn, nhưng không cải thiện độ bền tổng thể. Phân tích SEM cho thấy tro bay phân bố đều và bám tốt hơn so với ZnO, giúp lý giải cơ chế gia cường. Phân tích tối ưu bằng Minitab xác định được bộ thông số ép phun phù hợp cho từng loại vật liệu. Nhìn chung, tro bay là phụ gia hiệu quả và thân thiện môi trường, có tiềm năng thay thế một phần chất độn truyền thống trong sản xuất vật liệu kỹ thuật.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Vũ Quang Huy;
- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Vũ Quang Huy, Nguyễn Trường Vũ, Lê Anh Huy, Chu Hoài Thanh.

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: T2024-219).❖

Ngày nhận bài: **10/11/2025**
Ngày phản biện: **19/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Kohutiar, M., Kakošová, L., Krbata, M., Janík, R., Fekiač, J. J., Breznická, A., … Timárová, Ľ. (2025), "*Comprehensive review: technological approaches, properties, and applications of pure and reinforced polyamide 6 (PA6) and PA12 composite materials*". Polymers, 17(4), 442. https://doi.org/10.3390/polym17040442

[2]. "*Preparation of ZnO nanoparticle reinforced polyamide 6 composite*" (2018). Journal of Polymer Science. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110424

[3]. "*Influence of fly ash on thermo mechanical and mechanical behavior of PA6*" (2023). Journal of Environmental Chemical Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110424

[4]. "*Preparation and mechanism of fly ash based composite fillers with PA6*" (2024). Environmental Technology & Innovation. https://doi.org/10.1177/08927057241256940.

[5]. "*Thermomechanical properties of PA6 with biomass derived fly ash*" (2018). Researchgate. https://www.researchgate.net/publication/323129753_THERMOMECHANICAL_PROPERTIES_OF_POLYAMIDE_6_WITH_ADDITION_OF_FLY_ASH_FROM_BIOMASS

[6]. "*Mechanical, thermal, and flammability properties of PA6-TiO_2 composites*" (2022). Polymer Composites. https://doi.org/10.1177/08927057211067698

[7]. "*Effect of tetra needle shaped zinc oxide whisker on composite properties*" (2012). Composites Science and Technology. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.11.021 ScienceDirect

[8]. "*Modifying PA6 with high performance basalt fiber composites*" (2023). Journal of Applied Polymer Science. https://doi.org/10.1002/pc.28205 4spepublications.onlinelibrary.wiley.com