

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT TÍNH CHẤT CỦA VẬT LIỆU NANOCOMPOZIT VẢI SỢI CACBON/EPOXY GIA CƯỜNG VỚI GRAPHENE OXIT BIẾN TÍNH VỚI 3-AMINOPROPYL TRIMETHOXYSILANCE (APTES-GO)

FABRICATING AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER/EPOXY NANOCOMPOSITES REINFORCED WITH GRAPHENE OXIDE MODIFIED WITH 3-AMINOPROPYL TRIMETHOXYSILANCE (APTES-GO)

Trịnh Đức Công^{1,*}, Ngô Trịnh Tùng¹, Nguyễn Thị Thức¹, Đặng Thị Mai¹,
Trần Thị Ý Nhi¹, Trần Thị Thanh Hợp¹, Lê Đức Anh², Nguyễn Thế Hữu²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.277>

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, vật liệu polymer nanocompozit trên cơ sở vải sợi cacbon/epoxy gia cường graphen oxit (GO) và GO biến tính với 3-aminopropyl triethoxysilan (APTES) được chế tạo bằng phương pháp xếp lớp thủ công. Các tính chất vật liệu được khảo sát đánh giá bằng phổ hồng ngoại (FTIR), kính hiển vi điện tử quét (SEM), các tính chất cơ lý theo các tiêu chuẩn ISO, ASTM. Kết quả cho thấy, GO với nhóm chức -COOH đã được biến tính thành công với APTES làm vật liệu gia cường cho nhựa nền epoxy. Khi được gia cường GO-APTES, độ bền kéo đứt của vật liệu nanocompozit epoxy/GO-APTES đều cao hơn so với epoxy/GO và ở hàm lượng tối ưu GO-APTES là 0,3% vật liệu nanocompozit epoxy/GO-APTES có giá trị độ bền kéo đứt cao nhất 125,18MPa. Vật liệu nanocompozit vải sợi cacbon/epoxy/GO-APTES (0,3%) có độ bền kéo đứt 583,59MPa, độ bền uốn 338,25MPa và độ bền va đập 142,19kJ/m², cao hơn đáng kể so với các mẫu vật liệu nanocompozit vải sợi cacbon/epoxy không gia cường hay gia cường với GO. Nguyên nhân là do biến tính với APTES đã làm tăng tương tác pha giữa polyme nền epoxy với GO.

Từ khóa: Nanocompozit, graphene oxit, vải sợi cacbon, biến tính silane.

ABSTRACT

In this study, polymer nanocomposites based on carbon/epoxy reinforced with graphene oxide (GO) as well as GO modified with 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES) were prepared by hand lay-up technics. The properties of the materials were characterized by infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), the mechanical properties according to ISO, ASTM standards. The result reveals that GO with COOH group was successfully modified with APTES for reinforcement of epoxy. The tensile strength of epoxy/GO-APTES nanocomposites was higher than that of epoxy/GO nanocomposites. At the optimal GO-APTES content of 0.3%, the epoxy/GO-APTES reached the highest tensile strength of 125.18MPa. The polymer composites carbon/epoxy/GO-APTES have the tensile strength of 583.59MPa, bending strength of 338.25MPa and impact strength of 142.19kJ/m², higher than that of un-reinforcement or GO reinforcement epoxy. The reason was the stronger phase interaction between epoxy and GO modified with APTES.

Keywords: Nanocomposite, graphene oxide, carbon fiber, silane modification.

¹Viện Hóa học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Khoa Công nghệ Hóa, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: congvh@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/6/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/8/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/8/2024

1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, vật liệu compozit tính năng cao định hướng ứng dụng cho ngành hàng không, máy bay không người lái... đã thu hút được sự quan tâm nghiên cứu lớn trên thế giới cũng như trong nước. Trong số đó, vật liệu compozit trên cơ sở vải sợi cacbon và epoxy đã và đang được nghiên cứu, ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực đòi hỏi các tính năng cao của vật liệu do vải sợi cacbon có các tính chất cơ lý cao, có khả năng chịu nhiệt tốt nên có thể làm việc ổn định ở nhiệt độ cao trong thời gian dài, không bị tác động bởi yếu tố thời tiết như độ ẩm, bền trong các môi trường ăn mòn. Các công trình nghiên cứu [1-4] cũng đã cho thấy, vật liệu compozit trên cơ sở vải sợi cacbon có những ưu điểm nổi bật như độ bền cao, nhẹ có thể ứng dụng để chế tạo các sản phẩm dùng trong hàng không, trong phẫu thuật chỉnh hình thay thế các kim loại, hợp kim; các sản phẩm dùng trong thể thao như: thuyền kayak, gậy đánh golf và các loại dụng cụ thể thao khác....

Graphene là loại vật liệu có cấu trúc 2 chiều, trong đó C với lai hóa sp^2 đã tạo nên cấu trúc dạng tổ ong rất bền vững. Nó có những tính chất hết sức đặc biệt như độ bền cơ học cao, độ dẫn điện cao và khả năng che chắn dạng phân tử [5]. Do vậy, loại vật liệu này có nhiều triển vọng ứng dụng làm chất gia cường nano trong lĩnh vực như compozit, phủ và sơn. Tuy nhiên, nó có nhược điểm là khó phân tán trong dung môi hữu cơ và polyme. Trạng thái phân tán của vật liệu liên quan đến khả năng tương tác giữa graphene-polyme do lực hút van der Waals và tương tác giữa các sợi nano và môi trường phân tán. Vì vậy việc tạo ra vật liệu nano này với độ phân tán tốt và ổn định là một hướng nghiên cứu được nhiều nhà khoa học quan tâm. Hiện nay có rất nhiều phương pháp đã được tìm ra để khắc phục nhược điểm trên. Trong đó phương pháp chức năng hóa bằng cách thêm các nhóm chức năng vào bề mặt graphene là một trong những hướng đi hiệu quả để khắc phục những nhược điểm này. Các nhóm chức có thể là các nhóm hữu cơ như silan, amino hoặc ankan... [6-8] không chỉ là cách hiệu quả để ngăn ngừa sự tích tụ mà còn để cải thiện khả năng trộn lẫn của graphene với polyme bằng cách tăng cường tương tác bề mặt thông qua liên kết hóa học.

Trong nghiên cứu này, graphene oxit (GO) biến tính bề mặt bằng 3-aminopropyl trimethoxysilance (APTES) để làm vật liệu gia cường cho polymer nền epoxy nhằm chế tạo vật liệu polyme nanocompozit có tính năng cao vải sợi cacbon/epoxy. Các cấu trúc, tính chất vật liệu được khảo sát bằng phổ hồng ngoại (FTIR), kính hiển vi điện tử

quét (SEM), phân tích nhiệt khối lượng (TGA), các tính chất cơ lý theo tiêu chuẩn ISO, ASTM.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Hoá chất

Graphene (Sigma - Aldrich) dạng bột, kích thước hạt 25 μ m, diện tích bề mặt riêng 120 - 150m²/g, nhựa epoxy Epicote MGS LR 385 (Hexion, Đức), tỉ trọng: 1,18 - 1,23g/cm³; độ nhớt ở 25°C: 600 - 900mPas, chất đóng rắn epicure LH 386 (Hexion, Đức) tỉ trọng ở 20°C: 0,94 - 0,97g/cm³, vải cacbon CS16P-T800-55 (Trung Quốc), định lượng 55g/m²; độ dày 0,07mm.

2.2. Phương pháp chế tạo mẫu

2.2.1. Biến tính bề mặt của graphene oxit (GO) bằng 3-aminopropyl trimethoxysilance (APTES-GO)

Cân 0,5g graphene cho vào bình cầu đáy tròn 250ml, cho 60ml hỗn hợp dung dịch axit đậm đặc H₃PO₄:H₂SO₄ tỉ lệ 1:9 vào bình cầu tiến hành rung siêu âm hỗn hợp trong khoảng 30 phút sau đó cho tiếp 1g KMnO₄ vào hỗn hợp và khuấy gia nhiệt ở 50°C, trong 6 giờ. Hỗn hợp sau khi đủ thời gian phản ứng thì tiến hành pha loãng bằng 100ml nước deion và 5ml H₂O₂ sau đó tiến hành li tâm. Rửa nhiều lần bằng nước cất đến khi loại bỏ hoàn toàn bằng axit sau đó đem đi sấy chân không trong 48 giờ thu được GO-COOH.

Cân 0,125g GO-COOH vào cốc. Lấy cốc mới cân 5g (3-Aminopropyl) Trimethoxysilance và 93,84g EtOH khuấy trong 15 phút. Sau khi xong nhỏ từ từ GO-COOH vào (3-Aminopropyl) Trimethoxysilance điều chỉnh pH = 5 tiến hành khuấy liên tục trong vòng 2 giờ tại nhiệt độ phòng. Sau 2 giờ tiến hành điều chỉnh pH = 11 bằng dung dịch NaOH rồi tiến hành lọc, rửa bằng nước cất thu được APTES-GO.

2.2.2. Chế tạo vật liệu nanocompozit epoxy/ GO (GO- APTES) và compozit vải sợi cacbon/epoxy-GO (GO-APTES)

Để chế tạo vật liệu compozit, tỷ lệ chất đóng rắn: epoxy là 35% theo hướng dẫn của nhà sản xuất.

a) Chế tạo nanocompozit epoxy/ GO (GO-APTES)

Chuẩn bị hỗn hợp nhựa gồm: 50g epoxy và 17g chất đóng rắn, hai chất này được để ở các cốc riêng biệt. Phân tán GO, APTES-GO vào nhựa nền epoxy với các hàm lượng nghiên cứu: 0,1%; 0,2%, 0,3% và 0,4 % wt (so với hỗn hợp nhựa epoxy/chất đóng rắn) trong cốc thủy tinh bằng máy khuấy từ ở nhiệt độ 60°C với tốc độ 800 vòng/phút trong 30 phút để cho các hạt nano phân tán đồng đều trong nhựa epoxy, sau đó để nguội đến nhiệt độ phòng. Thêm

chất đóng rắn vào hỗn hợp, mẫu được khuấy đều trong 2 phút. Hỗn hợp keo epoxy/GO (GO-APTES) được tiến hành loại bỏ bọt khí có trong mẫu keo bằng cách hút chân không cho đến khi loại bỏ hoàn toàn các bọt khí. Sau đó, hỗn hợp keo được đổ vào các khuôn silicon theo tiêu chuẩn nghiên cứu và quá trình đóng rắn xảy ra ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ. Quá trình xử lý nhiệt sau đóng rắn được thực hiện trong tủ sấy ở nhiệt độ 60°C, thời gian 12 giờ. Các mẫu nghiên cứu được lưu mẫu và điều hòa ở nhiệt độ 25°C trong thời gian 7 ngày trước khi tiến hành đo tính chất cơ lý.

b) Chế tạo composit vải sợi cacbon/epoxy-GO (GO-APTES)

Composit vải sợi cacbon/epoxy-GO (GO-APTES) được chế tạo với tỉ lệ 60% vải sợi cacbon và 40% nhựa nền, số lớp vải sợi cacbon là 8 lớp. Sản phẩm được làm trên khuôn kính có kích thước 24x24cm, Để giảm sự bám dính của mẫu sau khi đóng rắn, các tấm teflon có độ dày 1,5mm được sử dụng như là các tấm lót giữa mẫu và khuôn ép. Keo epoxy/GO (GO-APTES) được chuẩn bị như trong mục a. Sau đó, các lớp vải cacbon được tẩm keo và xếp chồng lên nhau. Sau 24 giờ đóng rắn ở nhiệt độ phòng, mẫu được lấy ra khỏi khuôn ép và tiến hành sấy mẫu ở 60°C trong thời gian 12 giờ để mẫu được đóng rắn hoàn toàn. Các mẫu nghiên cứu được lưu mẫu và điều hòa ở nhiệt độ 25°C trong thời gian 7 ngày trước khi tiến hành đo tính chất cơ lý.

2.3. Phương pháp kiểm tra đánh giá vật liệu

- *Phương pháp xác định độ bền uốn:* Độ bền uốn của vật liệu được xác định theo tiêu chuẩn ISO 178:2010 (E) trên máy INSTRON 5582-100kN (Hoa Kỳ), tốc độ uốn 2mm/phút.

- *Phương pháp xác định độ bền kéo:* Độ bền kéo của vật liệu được xác định theo tiêu chuẩn ISO 527-1:2021 trên máy Gotech Testing Machine (Đài Loan). Tốc độ kéo 5mm/phút ở nhiệt độ phòng.

- *Phương pháp xác định độ bền va đập:* Độ bền va đập Izod của vật liệu được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D256 trên máy TM2101-T5.

- *Hình thái bề mặt vật liệu:* Hình thái bề mặt vật liệu được nghiên cứu bởi kính hiển vi điện tử quét (SEM, Zeiss JSM 6610 LA - Jeol, Nhật Bản).

- *Hình thái cấu trúc vật liệu:* Hình thái cấu trúc vật liệu được phân tích phổ hồng ngoại trên máy phổ hồng ngoại GXPerkinElmer- USA trong vùng từ 450 ÷ 4000cm⁻¹.

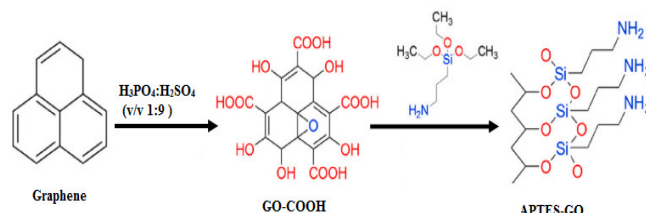
- *Phân tích nhiệt trọng lượng TGA:* Sử dụng thiết bị phân tích nhiệt TGA, Labsys, Stearam, Pháp với dải đo từ

25 ÷ 600°C, tốc độ gia nhiệt 5°/phút trong môi trường khí nitơ.

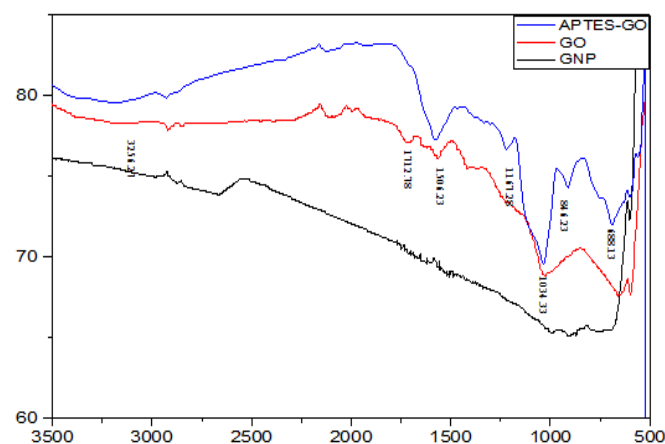
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Khảo sát biến tính bề mặt graphene oxit với APTES

Tiến hành gắn các nhóm chức hữu cơ silan lên bề mặt GO thông qua phản ứng giữa GO-COOH phản ứng với các chất hữu cơ 3-aminopropyl triethoxysilan:



Hình 1 so sánh phổ FTIR của graphen ban đầu, GO và GO biến tính APTES. Phân tích các đỉnh phổ FTIR cho thấy, pic ở số sóng 3256,27cm⁻¹ đặc trưng cho dao động của nhóm -OH trong GO. Đây cũng có thể là liên kết giữa nhóm -OH của GO với nước hấp thụ, hoặc giữa các nhóm -OH của GO với nhau. Các pic ở số sóng 1712,28cm⁻¹ là đặc trưng cho nhóm cacbonyl của andehyde hoặc axit hoặc xeton. Pic số sóng 1622,52cm⁻¹ tương ứng với dao động C-OH của nhóm hydroxyl [4]. Trong phổ FTIR của APTES-GO cho thấy có các đỉnh hấp thụ đặc trưng ở 1167,28cm⁻¹ là dao động của nhóm Si-O-C và đỉnh hấp thụ phụ tại 1034,33cm⁻¹ do dao động của Si-O-H. Các đỉnh 846,23cm⁻¹ và 688,13cm⁻¹ là dành cho các dao động kéo giãn và uốn của mạng Si-O-Si [5], điều này khẳng định có sự phản ứng của 3-aminopropyl triethoxysilan với GO-COOH để tạo thành APTES-GO được hình thành.



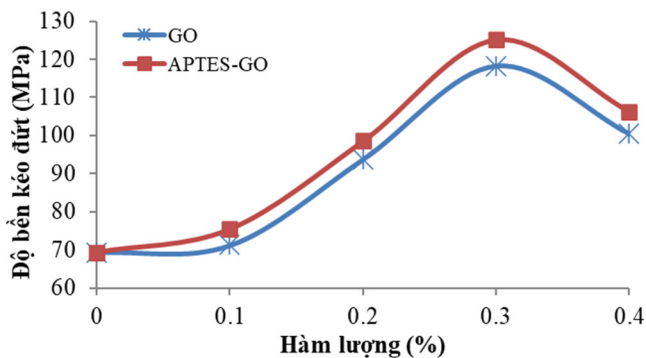
Hình 1. Phổ FTIR của Graphene (GNP), GO và APTES-GO

3.2. Nghiên cứu lựa chọn hàm lượng APTES-GO tối ưu trong nhựa nền epoxy

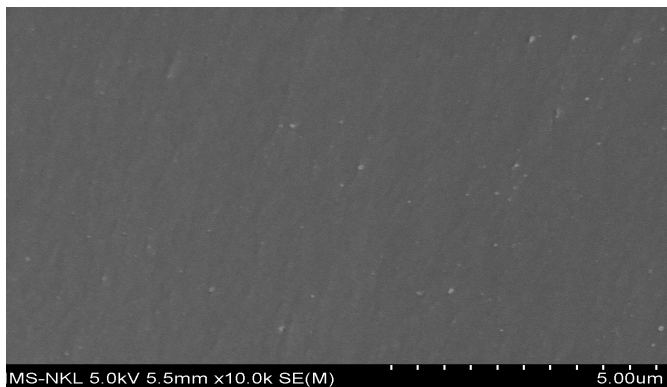
Để nghiên cứu lựa chọn hàm lượng phụ gia trong nhựa nền epoxy tiến hành đo độ bền kéo đứt với hàm

lượng GO và APTES-GO khác nhau từ 0 - 0,4% khối lượng so với nhựa nền epoxy. Độ bền kéo đứt của các mẫu nanocompozit epoxy/GO và epoxy/APTES-GO được chỉ ra trong hình 2.

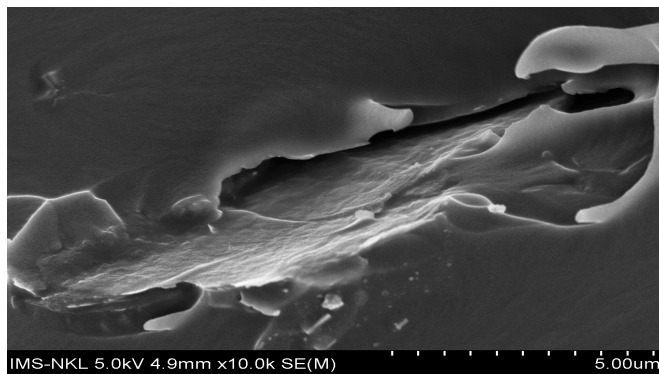
Kết quả ở hình 2 cho thấy độ bền kéo đứt tăng khi tăng hàm lượng phụ gia từ 0% đến 0,3%, tuy nhiên khi tăng hàm lượng phụ gia lên 0,3% thì độ bền kéo đứt lại giảm xuống. Đạt giá trị cao nhất tương ứng với hàm lượng 0,3%. Đồng thời vật liệu nanocompozit có APTES-GO thì độ bền kéo đứt tốt hơn so với có GO. Điều này được giải thích là do khi có thêm phụ gia GO, APTES-GO có sự xuất hiện của các nhóm carbonxyl và các nhóm hữu cơ như silan. Các nhóm này tạo thành các điểm hoạt hóa để tạo liên kết với các phân tử nhóm chức của các phân tử epoxy, giúp cho cấu trúc khi được điền đầy bằng GO hoặc mạch đại phân tử epoxy chèn vào giữa các lớp GO, độ bền liên kết giữa mạch đại phân tử epoxy với các lớp GO được tăng lên. Tuy nhiên, với 0,4% khối lượng GO thì sẽ tồn tại các hạt GO dư. Lúc này, trong hệ sẽ hình thành pha riêng biệt, phá vỡ cấu trúc đồng nhất của hệ epoxy/GO. Dưới tác dụng của ngoại lực, ứng suất sẽ phân bố không đều trong khối vật liệu làm cho độ bền của mẫu giảm. Điều này cũng được chứng minh thông qua hình thái cấu trúc của bề mặt gãy vật liệu nanocompozit tạo thành. Kết quả được chỉ ra trong hình 3.



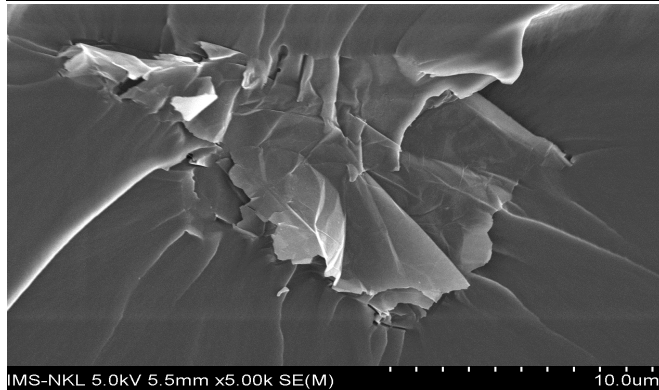
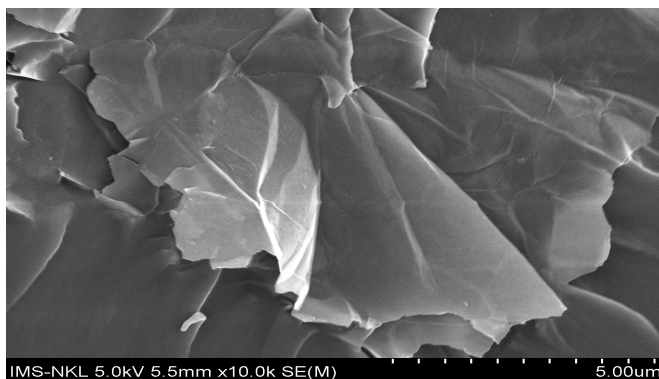
Hình 2. Độ bền kéo đứt của nanocompozit epoxy/GO và epoxy/APTES-GO



a)



b)



c)

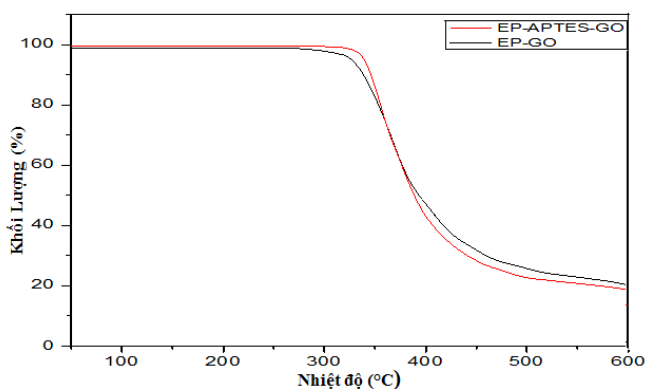
Hình 3. Ảnh chụp SEM bề mặt gãy của vật liệu nanocompozit a) epoxy, b) epoxy/GO, c) epoxy/APTES-GO

Từ hình 3a cho thấy, không chứa phụ gia thì bề mặt vật liệu nhẵn, phẳng khi có thành phần phụ gia từ hình 3b, 3c cho thấy bề mặt đứt gãy của nanocompozit chứa GO chưa biến tính liên kết không chặt chẽ với nhựa nền epoxy trong khi đó bề mặt đứt gãy của nanocompozit chứa APTES-GO phân tán tốt và đồng đều trong nhựa epoxy. Việc biến tính GO đã cải thiện sự phân tán và liên kết liên bề mặt của chúng với nền epoxy do sự hình thành của các nhóm chức hữu cơ silan trên bề mặt của GO. Tải trọng từ bên ngoài áp đặt lên mẫu vật liệu được chuyển tải đều đến APTES-GO và nền epoxy khi APTES-GO phân tán đồng đều (không kết tụ) và kết dính tốt với nền epoxy. Trong khi đó, trong trường hợp không biến tính, sự tập

hợp và liên kết liên bề mặt yếu của GO với nền epoxy gây ra sự không tạo kết dính tại liên bề mặt, tạo ra vết nứt.

Độ bền nhiệt của vật liệu epoxy/GO và epoxy/APTES-GO được đánh giá bằng phương pháp phân tích nhiệt khối lượng (TGA). Hình 4 là giản đồ phân tích nhiệt khối lượng TGA của vật liệu nanocompozit epoxy/GO và epoxy/APTES-GO.

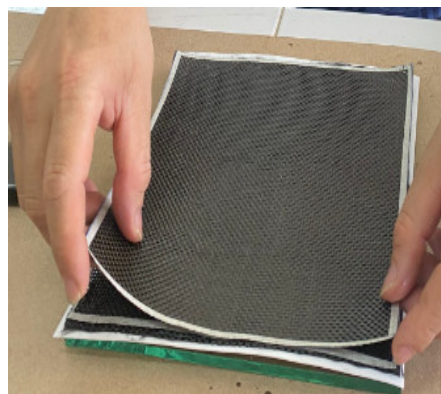
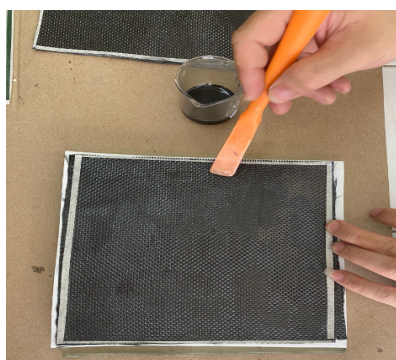
Kết quả cho thấy có sự khác biệt rõ rệt của nhiệt độ phân hủy ban đầu của epoxy gia cường GO và APTES-GO. Nhiệt độ bắt đầu phân hủy epoxy/GO là 298,23°C. Khi được gia cường với APTES-GO, nhiệt độ bắt đầu phân hủy của epoxy/APTES tăng lên rõ rệt 345,63°C. Nguyên nhân cho sự gia tăng nhiệt độ phân hủy ban đầu của epoxy/APTES-GO là do các nhóm chức COOH của GO được thay thế bằng các nhóm chức silane có độ bền phân hủy nhiệt cao hơn [9].



Hình 4. Phân tích nhiệt TGA của nanocompozit epoxy/GO và epoxy/APTES-GO

3.3. Khảo sát tính chất cơ học của vật liệu nanocompozit vải sợi cacbon/epoxy/APTES-GO

Để đánh giá ảnh hưởng của GO biến tính với APTES, các mẫu nanocompozit vải sợi cacbon, vải sợi cacbon/epoxy-GO (0,3%) và vải sợi cacbon/epoxy-GO-APTES (0,3%) được chế tạo. Tỷ lệ vải sợi cacbon/epoxy là 60/40, số lớp vải sợi 8 lớp. Kết quả đo độ bền kéo, độ bền va đập và độ bền uốn được tóm tắt trong bảng 1 (mỗi mẫu được đo 3 lần và lấy giá trị trung bình).



Hình 5. Một số hình ảnh chế tạo mẫu nanocompozit vải sợi cacbon/epoxy

Bảng 1. Tính chất cơ học của vật liệu nanocompozit

Ký hiệu mẫu	Độ bền kéo (MPa)	Độ bền va đập (kJ/m ²)	Độ bền uốn (MPa)
Vải sợi cacbon/epoxy	548,36	133,40	317,45
Vải sợi cacbon/epoxy-GO (0,3%)	565,63	137,70	327,71
Vải sợi cacbon/epoxy-APTES-GO (0,3%)	583,60	142,19	338,25

Kết quả bảng 1 chỉ ra rằng, vật liệu nanocompozit vải sợi cacbon/epoxy khi có mặt của GO và APTES-GO thì các tính chất cơ học (độ bền kéo đứt, độ bền va đập, độ bền uốn) tốt hơn so với mẫu không được gia cường. Trong đó mẫu vật liệu gia cường với APTES-GO có các tính chất cơ học là tốt nhất, tăng khoảng 6,3 - 6,7% so với mẫu không có chất gia cường. Độ bền kéo đứt của composit vải sợi

cacbon/epoxy-APTES-GO (0,3%) là 583,60MPa, độ bền va đập 142,19kJ/m² và độ bền uốn 338,25MPa. Điều này được giải thích như sau: Khi gắn nhóm chức hữu cơ silan vào GO (APTES-GO) thì các nhóm chức hữu cơ này tạo các liên kết cộng hóa trị với các phân tử nhóm chức của epoxy và vải sợi cacbon, giúp làm tăng tương tác pha, tăng khả năng kết dính tạo lên cấu trúc nanocompozit có độ sít chặt, gắn kết chặt chẽ giữa chất gia cường, nhựa nền epoxy và vải sợi cacbon dẫn đến tính chất cơ học của vật liệu được nâng cao hơn so với GO chưa biến tính và mẫu không chứa GO [6].

4. KẾT LUẬN

Đã nghiên cứu chế tạo được vật liệu polyme nanocompozit trên cơ sở vải sợi cacbon/epoxy gia cường graphen oxit (GO) và GO biến tính với 3-aminopropyl triethoxysilan (APTES) được chế tạo bằng phương pháp xếp lớp thủ công. Kết quả cho thấy, GO với nhóm chức COOH đã được biến tính thành công với APTES làm vật liệu gia cường cho nhựa nền epoxy. Khi được gia cường GO-APTES, độ bền kéo đứt của vật liệu compozit epoxy/GO-APTES đều cao hơn so với epoxy/GO và ở hàm lượng tối ưu GO-APTES là 0,3% vật liệu nanocompozit epoxy/GO-APTES có giá trị độ bền kéo đứt cao nhất 125,18MPa. Vật liệu compozit vải sợi cacbon/epoxy/GO-APTES (0,3%) có độ bền cơ học tăng từ 6,3 - 6,7% so với mẫu không chứa chất gia cường đạt giá trị độ bền kéo đứt 583,6MPa, độ bền uốn 338,25MPa, độ bền va đập 142,19kJ/m². Điều này có ý nghĩa quan trọng trong ứng dụng của vật liệu đòi hỏi cần tính chất cơ học cao.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ đã tài trợ cho nghiên cứu này với đề tài mã số NĐT/AT/22/22.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jesus Guerrero-Contreras, F. Caballero-Briones, "Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method," *Materials Chemistry and Physics*, 1-12, 2015.
- [2]. MK Hossain, MMR Chowdhury, MBA Salam, N Jahan, "Enhanced mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by incorporating XD-grade carbon nanotube," *Journal of Composite Materials*, 49(18), 1-13, 2014. DOI: 10.1177/0021998314545186
- [3]. P Phani Prasanthi, MSR Niranjana Kumar, Msomaiah Chowdary, "Mechanical properties of carbon fiber reinforced with carbon nanotubes and graphene filled epoxy composites: experimental and numerical investigations," *Mater. Res. Express* 10, 025308, 2023.

[4]. Xuming Yao, Xinyu Gao, Jianjun Jiang, Chumeng Xu, "Comparison of carbon nanotubes and graphene oxide coated carbon fiber for improving the interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites," *Composites Part B*, 132, 170e177, 2018.

[5]. Vishal Kandathil, Aisha Siddiqua, "NHC-Pd complex heterogenized on graphene oxide for cross-coupling reactions and supercapacitor applications," *Appl Organomet Chem.*, e5924., 2020.

[6]. Nazrul Islam Khan, Sudipta Halder, "Surface oxidized/silanized graphite nanoplatelets for reinforcing an epoxy matrix," *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123851, 2021.

[7]. Celina Maria Damilan, Maria Adina Vulcan, "Graphene oxide functionalization with silanes for advanced compatibility in epoxy nanocomposite," *U.P.B. Sci. Bull., Series B*, 78, 1, 2016.

[8]. Yasin Altin, Hazal Yilmaz, "Graphene oxide modified carbon fiber reinforced epoxy composites," *J Polym Eng*, 40(5): 415-420, 2020.

[9]. A. M. Shanmugaraj, J. H. Bae, Kwang Yong Lee, Woo Hyun Noh, Se Hyoung Lee, Sung Hun Ryu, "Physical and chemical characteristics of multiwalled carbon nanotubes functionalized with aminosilane and its influence on the properties of natural rubber composites," *Composites Science and Technology*, 67, 1813-1822, 2007.

AUTHORS INFORMATION

**Trinh Duc Cong¹, Ngo Trinh Tung¹, Nguyen Thi Thuc¹,
Dang Thi Mai¹, Tran Thi Y Nhi¹, Tran Thi Thanh Hop¹,
Le Duc Anh², Nguyen The Huu²**

¹Institute of Chemistry, Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam

²Faculty of Chemical Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam