

NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CƠ TÍNH CỦA VẬT LIỆU COMPOSITE
NỀN EPOXY BẰNG CÁC PHỤ GIA BIẾN TÍNH PHỤC VỤ CHẾ TẠO
THUYỀN CỨU HỘ HÀNG HẢI
ENHANCEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY-BASED
COMPOSITES USING MODIFYING ADDITIVES FOR
MARINE RESCUE BOAT APPLICATIONS

DOÃN QUÝ HIẾU, ĐỖ ĐÌNH TRUNG*

Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga

*Email liên hệ: trungdodinh.vrt@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.938>

Tóm tắt

Nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của phụ gia biến tính DEG-1 và hợp chất hữu cơ titan đến tính chất cơ - lý của vật liệu composite nền epoxy ED-20 gia cường bằng vải sợi thủy tinh EZ-200. Các mẫu composite được chế tạo bằng phương pháp lăn ép thủ công, đóng rắn bằng MTHPA hoặc hệ titan - amine, và được khảo sát các chỉ tiêu khối lượng riêng, độ bền kéo, độ bền uốn, độ bền va đập và đặc tính cơ nhiệt động. Kết quả cho thấy, khi bổ sung DEG-1, khối lượng riêng của composite giảm xuống $1,489\text{g/cm}^3$ và độ bền va đập đạt giá trị cao nhất $13,348\text{kJ/m}^2$. Việc sử dụng hợp chất hữu cơ titan mang lại hiệu quả tăng cường cơ học rõ rệt, với độ bền kéo đạt $230,106\text{MPa}$ và độ bền uốn đạt $358,10\text{MPa}$ tại hàm lượng titan tối ưu. Phân tích cơ nhiệt động cho thấy nhiệt độ thủy tinh hóa T_g của composite tăng lên đến 113°C khi hàm lượng titan đạt 15%, chứng tỏ mạng polymer có độ ổn định nhiệt cao hơn đáng kể. Các kết quả này khẳng định rằng sự kết hợp hợp lý giữa DEG-1 và hợp chất hữu cơ titan giúp cải thiện đồng thời độ bền và độ ổn định nhiệt của composite epoxy, đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật đối với vật liệu chế tạo thân vỏ thuyền cứu hộ hàng hải làm việc trong điều kiện môi trường biển khắc nghiệt.

Từ khóa: Composite epoxy, biến tính vật liệu, hợp chất titan, DEG-1, thuyền cứu hộ hàng hải.

Abstract

This study focuses on evaluating the effects of the modifying additive DEG-1 and an organic titanium compound on the mechanical and physical properties of ED-20 epoxy-based composites reinforced with EZ-200 fiberglass fabric. The

composite specimens were fabricated using the hand lay-up method, cured with MTHPA or a titanium-amine system, and characterized in terms of density, tensile strength, flexural strength, impact strength, and thermo-mechanical behavior. The results show that the incorporation of DEG-1 reduces the composite density to 1.489g/cm^3 and increases the impact strength to a maximum value of 13.348kJ/m^2 . The use of the organic titanium compound provides a pronounced mechanical reinforcement effect, with tensile strength reaching 230.106MPa and flexural strength reaching 358.10MPa at the optimal titanium content. Dynamic mechanical analysis indicates that the glass transition temperature (T_g) of the composite increases to 113°C at a titanium content of 15%, demonstrating a significantly enhanced thermal stability of the polymer network. These results confirm that an appropriate combination of DEG-1 and the organic titanium compound simultaneously improves the mechanical performance and thermal stability of epoxy composites, meeting the technical requirements for materials used in marine rescue boat hull structures operating under harsh marine environments.

Keywords: Composite epoxy, material modification, titanium compounds, DEG-1, marine rescue boats.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, vật liệu composite nền epoxy ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực hàng hải, đặc biệt là trong chế tạo phương tiện cứu hộ và các cấu kiện chịu tải trọng động. Nhựa epoxy được ưa chuộng nhờ khả năng bám dính cao, độ bền cơ học tốt và độ ổn định hóa học trong môi

trường nước biển. Tuy nhiên, epoxy nguyên bản thường có cấu trúc mạng polymer chặt, dẫn đến đặc tính giòn và khả năng chịu va đập thấp, khiến vật liệu dễ xuất hiện các vết nứt ứng suất khi làm việc trong điều kiện sóng gió mạnh hoặc chịu tác động va chạm liên tục. Do đó, các hướng nghiên cứu về biến tính epoxy nhằm nâng cao độ dai, độ bền uốn và độ bền kéo của composite ngày càng trở nên quan trọng.

Một số nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của việc biến tính epoxy bằng các hệ tác nhân khác nhau. Trần Vĩnh Diệu và Vũ Mạnh Cường [1] cho thấy sử dụng chất đóng rắn xyanetyl-diethylenetriamin kết hợp với cao su tự nhiên lỏng epoxy hóa có thể cải thiện rõ rệt tính chất cơ lý của màng epoxy, đặc biệt là độ bền kéo và khả năng phân tán ứng suất. Tương tự, Nguyễn Đình Lâm và Nguyễn Thanh Hội [2] đã chế tạo composite epoxy/amin gia cường bằng sợi xơ dừa và ghi nhận độ bền kéo, uốn, và độ bền va đập đều tăng lên nhờ tương hợp tốt giữa nền epoxy và pha sợi tự nhiên. Các kết quả này cho thấy sự cần thiết của việc cải tiến cấu trúc epoxy nhằm đạt được vật liệu composite có độ bền cao.

Ngoài các vật liệu sợi tự nhiên, nhiều nghiên cứu tập trung vào tăng cường composite bằng các pha nano như ống nano carbon (CNT). Trần Hữu Nam và cộng sự [3] sử dụng phương pháp nong-kéo để định hướng CNT trong nền epoxy, qua đó cải thiện đáng kể độ bền cơ học của composite. Các tác giả khác như Nam, Hùng và Thắng [4] cũng ghi nhận vật liệu epoxy chứa CNT định hướng có mô đun đàn hồi và độ bền vượt trội so với epoxy nguyên chất. Những nghiên cứu này tương đồng với các kết quả quốc tế, tiêu biểu như công trình của Liu và cộng sự [5], trong đó CNT được cuốn lên trục mandrel kết hợp phun polyvinyl alcohol, tạo ra composite có độ bền cao hơn đáng kể. Nghiên cứu của Ji và cộng sự [6] cũng chỉ ra rằng sợi nano gia cường CNT định hướng có thể đạt mức tăng cơ tính vượt trội nhờ sự phân tán và định hướng tốt.

Bên cạnh hướng gia cường bằng CNT, các nghiên cứu dùng sợi tự nhiên diện rộng, đặc biệt là sợi chuối, cũng thu hút sự quan tâm. Nguyễn Thị Hằng Nga và cộng sự [7] khảo sát composite đa lớp nền epoxy gia cường sợi chuối, chứng minh rằng với quy trình xử lý và bố trí lớp hợp lý, vật liệu đạt độ bền kéo và uốn cao hơn epoxy nguyên bản, đồng thời có khả năng phân tán ứng suất tốt hơn. Các kết quả này phù hợp với các nghiên cứu quốc tế của Mohan & Kanny [8], Parre và cộng sự [9], và Balaji và cộng sự [10], trong đó composite sợi chuối - epoxy, sau xử lý NaOH hoặc ép đúc áp suất, sở hữu độ bền cơ học và độ ổn định nhiệt cao hơn nhiều so với composite từ sợi tự nhiên không xử lý.

Ở hướng biến tính nền epoxy, Đỗ Thị Thu Thủy và cộng sự [11] đã chế tạo epoxy biến tính bằng thiokol lỏng nhằm sử dụng trong ngành hàng không và chỉ ra rằng việc đưa các phân tử mềm có thể làm tăng đáng kể độ dai và độ ổn định của mạng polymer. Điều này gợi mở khả năng áp dụng các hệ oligomer hoặc tác nhân biến tính khác để cải thiện độ dai và đập của epoxy trong ứng dụng hàng hải.

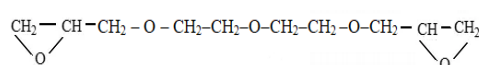
Tổng quan các công trình trên cho thấy ba xu hướng chính trong cải thiện vật liệu composite epoxy: (i) gia cường bằng sợi tự nhiên nhằm giảm khối lượng riêng và tăng độ phân tán ứng suất; (ii) gia cường bằng sợi nano, đặc biệt là CNT định hướng, nhằm tăng mô đun và độ bền kéo; (iii) biến tính nền epoxy để tăng độ dai và giảm sự giòn hóa. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào các ứng dụng cơ khí tổng quát, trong khi yêu cầu đối với vật liệu dành cho thuyền cứu hộ hàng hải lại đặc thù hơn, bao gồm khả năng chịu va đập mạnh, độ bền động cao, ổn định nhiệt và chống ăn mòn lâu dài trong môi trường nước biển.

Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu các hệ biến tính epoxy như oligomer DEG-1 và hợp chất hữu cơ titan có ý nghĩa đặc biệt. Các hệ này không chỉ thay đổi cấu trúc mạng polymer mà còn tạo ra sự cân bằng giữa độ dẻo, độ bền uốn và độ cứng, qua đó hướng tới phát triển vật liệu composite tối ưu cho ứng dụng chế tạo thân vỏ thuyền cứu hộ - nơi đòi hỏi vật liệu vừa nhẹ vừa phải chịu được điều kiện khai thác khắc nghiệt. Trên cơ sở kế thừa và mở rộng các kết quả từ những nghiên cứu trước đây [1-11], công trình này tập trung đánh giá một cách có hệ thống ảnh hưởng của các hệ biến tính DEG-1 và titan đến tính chất cơ - lý của composite epoxy ED-20, làm cơ sở cho việc phát triển vật liệu mới có hiệu năng vượt trội cho ngành hàng hải.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là vật liệu composite nền epoxy được gia cường bằng vải sợi thủy tinh và biến tính bằng hai hệ phụ gia gồm oligomer DEG-1 và hợp chất hữu cơ titan. DEG-1 là sản phẩm thương mại, được hình thành trên cơ sở phản ứng ngưng tụ giữa diethylene glycol với epichlorohydrin. DEG-1 có công thức phân tử: $C_{10}H_{18}O_5$. Công thức cấu tạo:



DEG-1 là chất lỏng màu nâu đỏ có độ nhớt thấp với một số đặc tính như Bảng 1.

Bảng 1. Đặc tính của DEG-1

Các chỉ số	Định mức theo TU 2225-390-04872688-98
Thành phần epoxy (%)	> 25
Thành phần ion clo (%)	< 0,05
Thành phần clo hoá (%)	< 1,4
Chất dễ bay hơi (%)	< 1,5
Độ nhớt động lực (Pa.s)	< 0,07

Nhựa epoxy sử dụng là epoxy ED-20, một loại epoxy lỏng bisphenol-A có độ nhớt trung bình và khả năng bám dính cao, được dùng phổ biến trong công nghiệp composite. Chất gia cường là vải sợi thủy tinh dạng dệt thoi EZ-200 với trọng lượng bề mặt 200g/m² (Bảng 2), có ưu điểm độ bền kéo cao, ổn định hóa học và tương thích tốt với nhựa epoxy.

Bảng 2. Chỉ tiêu kỹ thuật của vải EZ-200

Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
Độ dày	mm	0,190 ± 0,01
Mật độ bề mặt	g/m ²	200 ± 10
Tải trọng theo chiều dọc	N(kgf)	1127 (115)
Tải trọng theo chiều ngang	N(kgf)	1078 (110)
Mật độ vải theo chiều dọc	sợi/cm	10 ± 1
Mật độ vải theo chiều ngang	sợi/cm	9 ± 1
Chiều rộng vải	cm	95

Bảng 3. Thành phần các mẫu thử

Các mẫu	Thành phần
MS1	MTHPA+vải EZ-200
MS2	MTHPA+DEG-1+vải EZ-200
MS3	MTHPA+DEG-1+titan5%+vải EZ-200
MS4	MTHPA+DEG-1+titan10%+vải EZ-200
MS5	MTHPA+DEG-1+titan15%+vải EZ-200

Hai hệ biến tính được lựa chọn nhằm mục tiêu cải thiện đồng thời độ dai, độ bền cơ học và độ ổn định nhiệt của vật liệu. DEG-1 là oligomer epoxy có cấu trúc phân tử linh hoạt hơn epoxy ED-20, có khả năng tham gia phản ứng đóng rắn và tạo ra các đoạn polymer mềm trong mạng lưới, từ đó làm tăng khả năng biến dạng và hấp thụ năng lượng va đập. Hợp chất hữu cơ titan (titan alkoxide) đóng vai trò là tác nhân biến tính vô cơ - hữu cơ, có khả năng tham gia vào quá trình hình thành mạng polymer thông qua việc tạo ra các liên kết phối trí giữa nguyên tử titan và các nhóm hydroxyl/epoxy trong hệ nhựa, từ đó làm tăng mật độ liên kết ngang và nâng cao độ đồng nhất của mạng polymer epoxy sau quá trình đóng rắn. Việc kết hợp hai hệ biến tính DEG-1 và titan được định hướng nhằm tạo ra sự cân bằng tối ưu giữa độ dẻo, độ

bền cơ học và độ ổn định nhiệt - phù hợp với yêu cầu đặc thù của vật liệu chế tạo thuyền cứu hộ hàng hải. Các mẫu thử được mã hóa như thể hiện ở Bảng 3.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Quy trình chế tạo mẫu composite

Mẫu composite được chế tạo bằng phương pháp lăn ép thủ công (hand lay-up), một kỹ thuật phổ biến trong công nghiệp đóng tàu nhờ tính đơn giản, chi phí thấp và khả năng tạo lớp vật liệu đều. Quy trình thực hiện gồm các bước sau:

Nhựa epoxy ED-20 được phối trộn với chất biến tính (DEG-1 hoặc titan) theo tỷ lệ định sẵn, sau đó được khuấy đều trong 10-15 phút để đảm bảo phân tán hoàn toàn. Chất đóng rắn MTHPA hoặc hệ titan-amine được bổ sung cuối cùng nhằm tránh phản ứng sớm. Hỗn hợp nhựa sau khi pha được quét một lớp mỏng lên bề mặt khuôn đã xử lý chống dính. Các lớp vải sợi thủy tinh EZ-200 được đặt lần lượt lên khuôn và thấm nhựa bằng rulô để loại bỏ bọt khí và đảm bảo nhựa thấm đều vào cấu trúc sợi. Số lớp vải và tỷ lệ nhựa-sợi được duy trì ở mức 1:2, nhằm đảm bảo trọng lượng nhẹ nhưng vẫn đạt độ bền cơ học cao.

Sau khi hoàn thiện quá trình lăn ép, mẫu được để đóng rắn ở điều kiện nhiệt độ phòng trong 24 giờ, sau đó được gia nhiệt ở 60-80°C trong 3 giờ nhằm hoàn thiện quá trình đóng rắn và ổn định mạng polymer. Mẫu composite sau khi đóng rắn được cắt theo tiêu chuẩn và gia công mép để phục vụ thử nghiệm.

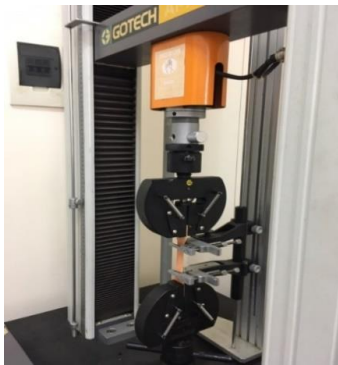
Mỗi chỉ tiêu cơ học và cơ nhiệt (kéo, uốn, va đập, DMTA) được thực hiện trên tối thiểu 3-5 mẫu độc lập cho mỗi thành phần vật liệu. Kết quả trình bày trong bài báo là giá trị trung bình của các mẫu thử. Dữ liệu được xử lý thống kê thông qua giá trị trung bình và độ lệch chuẩn nhằm đảm bảo độ tin cậy và khả năng lặp lại của kết quả.

Phương pháp thí nghiệm

Để đánh giá toàn diện ảnh hưởng của biến tính đến tính chất của composite, các chỉ tiêu sau được khảo sát: Khối lượng riêng; Độ bền kéo: Mẫu kéo được thử trên máy GOTECH theo tiêu chuẩn ASTM D3039. Thí nghiệm cung cấp các thông số như giới hạn bền

kéo, mô đun đàn hồi và độ giãn dài tại điểm đứt, giúp đánh giá ảnh hưởng của titan và DEG-1 đến khả năng chịu kéo của composite; Độ bền uốn: Độ bền uốn ba điểm được xác định bằng máy INSTRON theo tiêu chuẩn ASTM D790. Các yếu tố như độ mềm dẻo, độ cứng bề mặt và khả năng chịu tải trọng uốn được phân tích từ đồ thị ứng suất - biến dạng thu được.

Độ bền va đập: Thử nghiệm va đập kiểu Charpy được thực hiện bằng thiết bị H.J.M nhằm xác định khả năng hấp thụ năng lượng va đập của vật liệu. Chỉ tiêu này đặc biệt quan trọng đối với các kết cấu thuyền cứu hộ chịu tác động xung kích mạnh; Phân tích cơ nhiệt động (DMTA) được thực hiện trên thiết bị DMTA8000 để xác định nhiệt độ hóa thủy tinh T_g , mô đun đàn hồi động và tổn hao cơ học. Thông số T_g là chỉ tiêu then chốt đánh giá độ ổn định nhiệt và chất lượng mạng polymer.



Hình 1. Máy GOTECH đo độ bền kéo



Hình 2. Thiết bị đo độ bền uốn INSTRON 5582-100 KN

Các dữ liệu thí nghiệm được xử lý bằng phương pháp thống kê, sử dụng giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của các mẫu thử. Kết quả được so sánh định lượng giữa các mẫu thử được biến tính. Việc phân tích dựa trên mối tương quan giữa cấu trúc vật liệu và tính chất cơ học nhằm hiểu rõ cơ chế cải thiện do các hệ biến tính mang lại.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Khối lượng riêng

Kết quả cho thấy khối lượng riêng của composite epoxy nguyên chất vào khoảng $1,25\text{g/cm}^3$. Khi bổ

sung DEG-1 hoặc titan alkoxide, khối lượng riêng các mẫu thử được thể hiện trên Bảng 4.

Bảng 4. Giá trị khối lượng riêng các mẫu

Các mẫu	Khối lượng riêng (g/cm^3)
MS1	1,667
MS2	1,489
MS3	1,560
MS4	1,665
MS5	1,823

3.2. Độ bền uốn

Các mẫu composite sử dụng hệ biến tính cho độ bền uốn cao hơn epoxy nguyên bản. Cụ thể, DEG-1 giúp vật liệu đạt độ bền uốn cao hơn khoảng 10-20%, trong khi titan alkoxide đem lại mức tăng 20-30%. Điều này có được nhờ DEG-1 làm mềm cấu trúc polymer, giảm ứng suất tập trung, còn titan tạo liên kết ngang mạnh giúp tăng độ cứng của mạng polymer.

Bảng 5. Giá trị độ bền uốn các mẫu

Các mẫu	Độ bền uốn (MPa)
MS1	208,40
MS2	215,72
MS3	236,70
MS4	358,10
MS5	261,62

Kết quả cho thấy, vật liệu composite gia cường sợi thủy tinh sử dụng đóng rắn MTHPA có độ bền uốn thấp nhất ($= 208,4\text{MPa}$), hệ nhựa sử dụng hợp chất hữu cơ titan đạt độ bền uốn cao, với mẫu Titan 5 và Titan 15 đạt lần lượt $236,7\text{MPa}$ và $261,62\text{MPa}$ và mẫu Titan 10 cho độ bền uốn cao nhất là $358,1\text{MPa}$. Việc sử dụng chất biến tính cơ titan trên vật liệu composite gia cường sợi thủy tinh làm tăng độ bền kéo của vật liệu composite tốt hơn khi chỉ sử dụng chất biến tính DEG-1.

3.3. Độ bền kéo

Composite với hệ biến tính titan-amine đạt giá trị độ bền kéo cao nhất. Sự cải thiện từ 15 đến 25% so với epoxy nguyên chất chứng tỏ rằng titan tham gia tích cực vào việc hình thành mạng polymer bền vững, làm giảm các khuyết tật vi mô trong vật liệu.

Kết quả đo cho thấy, vật liệu composite gia cường sợi thủy tinh sử dụng chất biến tính hữu cơ titan cho độ bền kéo cao nhất ($230,106\text{MPa}$) tại hàm lượng 10 (phần trăm) hợp chất hữu cơ titan.

Tại các hàm lượng khác là mẫu MS3 và MS5, độ

bền kéo lần lượt đạt 174,19MPa và 182,691MPa. Các giá trị này cao hơn so với vật liệu composite chỉ sử dụng MTHPA (= 141,654MPa). Như vậy, với việc sử dụng chất biến tính hữu cơ titan đã làm tăng độ bền kéo của vật liệu composite gia cường sợi thủy tinh so với khi chỉ sử dụng MTHPA.

Bảng 6. Giá trị độ bền kéo các mẫu

Các mẫu	Độ bền kéo (MPa)
MS1	141,654
MS2	156,662
MS3	174,190
MS4	230,106
MS5	182,691

3.4. Độ bền va đập

Độ bền va đập là yếu tố quyết định đối với vật liệu sử dụng cho thuyền cứu hộ, bởi phương tiện thường xuyên phải chịu các tác động xung kích mạnh. Các mẫu sử dụng DEG-1 thể hiện khả năng hấp thụ năng lượng và đập lớn hơn, nhờ việc DEG-1 tạo ra các đoạn polymer linh động trong cấu trúc. Hệ titan cũng đem lại cải thiện đáng kể do làm giảm mật độ khuyết tật và tăng tính đồng nhất của mạng polymer.

Kết quả đo cho thấy, vật liệu composite có sử dụng chất biến tính DEG-1 (có độ bền va đập là 13,348MPa) và vật liệu composite sử dụng đồng thời chất biến tính hữu cơ titan và biến tính DEG-1 đạt độ bền va đập là 22,5kJ/m² và 27,9kJ/m² đối với mẫu MS4 và MS5, vượt trội hơn so với các mẫu vật liệu composite chỉ sử dụng MTHPA (= 5,165kJ/m²).

Bảng 7. Giá trị độ bền va đập các mẫu

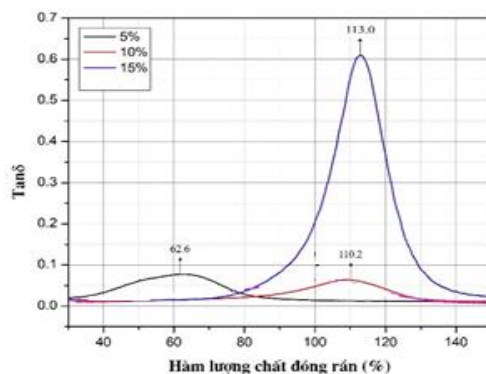
Các mẫu	Độ bền va đập (kJ/m ²)
MS1	5,165
MS2	13,348
MS3	18,668
MS4	22,5
MS5	27,9

3.5. Đặc tính cơ nhiệt động

Phân tích DMTA cho thấy nhiệt độ hóa thủy tinh T_g của epoxy nguyên bản chỉ khoảng 60°C, trong khi composite biến tính titan đạt T_g từ 90°C - 110°C. Điều này chứng tỏ vật liệu có độ ổn định nhiệt cao hơn, giúp thuyền chịu được điều kiện nắng nóng trực tiếp mà không bị biến dạng.

Kết quả nghiên cứu cho thấy vật liệu composite epoxy sử dụng DEG-1 và Titan Alkoxide đặc biệt phù

hợp cho chế tạo vỏ thuyền cứu hộ. Sự kết hợp của độ nhẹ, độ bền kéo cao, khả năng chịu uốn và va đập tốt giúp thuyền vận hành an toàn trong điều kiện biển động. Vật liệu còn có khả năng chống ăn mòn và chịu tia UV tốt, làm tăng tuổi thọ phương tiện.



Hình 3. Đường cong DMTA giữa $\tan \delta$ và nhiệt độ của các mẫu vật liệu composite sử dụng biến tính hữu cơ titan

Từ đồ thị Hình 3 nhận thấy, hàm lượng chất đóng rắn ảnh hưởng đáng kể đến sự biến đổi nhiệt độ thủy tinh hóa. Khi tăng hàm lượng chất biến tính hữu cơ titan từ 5% lên 15%, nhiệt độ T_g tăng dần và lớn nhất tại 15% tương ứng với nhiệt độ thủy tinh hóa là 113°C, tăng 80,51% so với mẫu chỉ có 5% chất biến tính là hợp chất hữu cơ titan. Cấu trúc vật liệu tối ưu được đề xuất gồm nhựa epoxy ED-20 biến tính với 10 - 15% DEG-1 và 5 - 10% Titan Alkoxide, gia cường bằng vải sợi thủy tinh 3 - 5 lớp, đóng rắn bằng hệ MTHPA - DMP-30. Cấu trúc này có thể được áp dụng trong sản xuất thân thuyền, boong, cabin cũng như các chi tiết phụ trợ khác.

Ngược lại, các mẫu biến tính Titan có xu hướng tăng mạnh độ bền kéo, độ bền uốn và nhiệt độ thủy tinh hóa T_g . Sự tăng này gắn liền với vai trò của các nhóm titan alkoxide trong việc tạo ra các điểm liên kết ngang bền vững, giúp mạng polymer đồng đều hơn, tăng mật độ liên kết, hạn chế các khuyết tật nội tại và cải thiện đáng kể độ ổn định nhiệt. Phân tích DMTA xác nhận xu hướng này khi T_g của epoxy nguyên bản chỉ khoảng 60°C, trong khi epoxy biến tính titan đạt đến 95°C - 110°C, cho thấy tính chịu nhiệt và khả năng làm việc ở môi trường nắng nóng của composite đã được nâng cao đáng kể.

Tính chất cơ học đạt cao nhất đối với mẫu chứa 10% titan alkoxide là kết quả của sự kết hợp giữa ba cơ chế cấu trúc chính: DEG-1, Titan10%, vải EZ-200 và phương pháp đóng rắn bằng MTHPA. DEG-1 là

oligomer epoxy có cấu trúc linh hoạt, tham gia trực tiếp vào phản ứng đóng rắn, tạo ra các đoạn polymer mềm trong mạng epoxy. Điều này giúp giảm tập trung ứng suất, tăng khả năng hấp thụ năng lượng va đập và cải thiện độ dai của composite. Các nhóm titan alkoxide có khả năng tạo liên kết phối trí với nhóm hydroxyl và epoxy, từ đó làm tăng mật độ liên kết ngang và độ đồng nhất của mạng polymer. Với hàm lượng hợp chất hữu cơ titan đạt khoảng 10%, các liên kết này được hình thành hiệu quả, giúp tăng khả năng truyền tải ứng suất từ nền epoxy sang hệ sợi gia cường, dẫn đến độ bền kéo và độ bền uốn đạt giá trị cực đại. Khi tăng hàm lượng hợp chất hữu cơ đến 15%, mặc dù T_g tiếp tục tăng do mật độ liên kết ngang cao hơn, nhưng mạng polymer trở nên cứng và kém linh động hơn, đồng thời có khả năng xuất hiện kết tụ cục bộ của pha titan. Điều này làm suy giảm nhẹ khả năng phân tán ứng suất, dẫn đến giảm một số chỉ tiêu cơ học (kéo, uốn), mặc dù độ bền va đập vẫn tiếp tục tăng. Như vậy, hàm lượng hợp chất hữu cơ titan 10% đại diện cho trạng thái cân bằng tối ưu giữa độ dẻo (do DEG-1 mang lại) và độ cứng - ổn định mạng (do titan alkoxide tạo ra). Sự kết hợp này, cùng với hệ gia cường vải sợi thủy tinh EZ-200 và phương pháp đóng rắn bằng MTHPA, tạo nên composite có cơ tính tổng hợp tốt nhất, phù hợp với yêu cầu chịu tải tĩnh - động và va đập của kết cấu thuyền cứu hộ hàng hải.

Ngoài ra, việc gia cường bằng vải sợi thủy tinh EZ-200 kết hợp với nhựa epoxy biến tính đã tạo ra một vật liệu composite có sự cân bằng tốt giữa độ nhẹ, độ cứng và độ bền động lực học, rất phù hợp với yêu cầu đặc thù của thuyền cứu hộ hàng hải, nơi thân vỏ phải chịu nhiều dạng tải trọng khác nhau như va đập trực diện, uốn cong do sóng và ăn mòn bởi nước biển. Các kết quả này không chỉ khẳng định hiệu quả của các hệ biến tính được lựa chọn mà còn cung cấp cơ sở khoa học quan trọng để phát triển vật liệu composite epoxy có tính năng cao phục vụ đóng tàu cứu hộ.

4. Kết luận

1) Biến tính epoxy bằng DEG-1 giúp cải thiện rõ rệt độ bền va đập và giảm khối lượng riêng của vật liệu composite. Khi bổ sung 10 - 15% DEG-1, độ bền va đập tăng từ khoảng 5,165kJ/m² lên 13,348kJ/m², cho thấy hiệu quả tăng cường khả năng hấp thụ năng lượng. Điều này chứng minh DEG-1 phù hợp với các cấu kiện cần độ dẻo và khả năng chịu tải trọng xung kích cao.

2) Hợp chất titan thể hiện vai trò vượt trội trong

việc nâng cao độ bền kéo, độ bền uốn và độ ổn định nhiệt của composite. Độ bền kéo tăng từ 156,662MPa lên 174,190 - 230,10 (MPa), độ bền uốn tăng từ 215,72MPa lên 236,70 - 358,10 (MPa), trong khi T_g tăng từ 60°C lên 95°C - 110°C. Kết quả cho thấy titan alkoxide đã góp phần tạo ra mạng polymer bền vững, tăng mật độ liên kết và cải thiện đáng kể khả năng làm việc của composite trong môi trường nhiệt độ cao và điều kiện biến động.

3) Trên cơ sở tổng hợp các kết quả cơ lý và cơ nhiệt động, nghiên cứu đề xuất vật liệu composite tối ưu cho thuyền cứu hộ hàng hải là hệ epoxy ED-20 biến tính kết hợp 10 - 15% DEG-1 và 5 - 10% titan alkoxide, gia cường bằng vải sợi thủy tinh EZ-200 và đóng rắn bằng hệ MTHPA - DMP-30. Cấu trúc này mang lại sự cân bằng giữa độ nhẹ, độ bền tĩnh - động và tính ổn định nhiệt, đáp ứng tốt các yêu cầu thực tế của thân vỏ thuyền cứu hộ. Bên cạnh đó, phương pháp chế tạo lặn ép thủ công được đánh giá là khả thi, dễ triển khai trong thực tiễn sản xuất, phù hợp với điều kiện cơ sở đóng tàu trong nước.

Lời cảm ơn

Bài báo này được nghiên cứu tại Viện Độ bền Nhiệt đới, Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga. Các tác giả trân trọng cảm ơn Thủ trưởng Viện Độ bền Nhiệt đới và Lãnh đạo Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga đã tạo mọi điều kiện thuận lợi để nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Vĩnh Diệu, Vũ Mạnh Cường (2012). *Nghiên cứu nâng cao tính chất cơ lý của màng Polymer epoxy nhờ sử dụng chất đóng rắn xyanetyldietylen-triamin và biến tính bằng cao su tự nhiên lỏng epoxy hóa*. Tạp chí Hóa học, Số 50(3), tr. 369-373.
- [2] Nguyễn Đình Lâm, Nguyễn Thanh Hội (2015). *Chế tạo và xác định tính chất cơ lý của vật liệu Composite trên nền Epoxy/Amin gia cường sợi xơ dừa*. Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng, Số 11, Quyển 2, tr. 99-102.
- [3] Trần Hữu Nam, Vũ Minh Hùng, Phạm Hồng Quang (2016). *Cải thiện tính chất cơ học của vật liệu compozit nền epoxy gia cường ống cacbon nano định hướng bằng phương pháp nong-kéo đơn giản*. Tạp chí phát triển Khoa học & Công nghệ, Tập 19, Số K7, tr. 35-44.
- [4] Nam T.H., Hung V.M., Thang V.Q.A (2015), *Study on improving properties of aligned multi-walled*

- carbon nanotube/epoxy composites. The University of Danang-J. Sci. Technol. Vol. 97(1), pp.38-42.
- [5]. Liu W., Zhang X., Xu G., Bradford P.D., Wang X., Zhao H., et al (2011). *Producing superior composites by winding carbon nanotubes onto a mandrel under a poly (vinyl alcohol) spray*. Carbon. Vol. 49(14), pp.4786-4791.
- [6]. Ji J., Sui G., Yu Y., Liu Y., Lin Y., Du Z., et al (2009). *Significant improvement of mechanical properties observed in highly aligned carbon-nanotube-reinforced nanofibers*. J. Phys. Chem. C. Vol.113(12), pp.4779-4785.
- [7] Nguyễn Thị Hằng Nga, Bạch Văn Toàn, Trần Quang Dinh, Lê Quang Khải (2023). *Nghiên cứu tính chất cơ học của vật liệu composite đa lớp nền epoxy gia cường bằng sợi chuối*. Tạp chí khoa học Kỹ thuật thủy lợi và Môi trường - Số 86, tr. 38-44.
- [8]. T.P. Mohan and K. Kanny (2021). *Processing of high weight fraction banana fiber reinforced epoxy composites using pressure induced dip casting method*, Journal of Composite Materials, pp.1-13.
- [9] A. Parre, B. Karthikeyan, A. Balaji, R. Udhayasankar (2020). *Investigation of chemical, thermal and morphological properties of untreated and NaOH treated banana fiber*, Materials Today: Proceedings, Vol.22, Part 3 pp.347-352.
- [10] A. Balaji, R. Purushothaman, R. Udhayasankar, S. Vijayaraj, B. Karthikeyan (2020). *Study on Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Banana Fiber-Reinforced Epoxy Composites*. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion 6:60.
- [11] Đỗ T. T. T., Phạm D. N., Vương V. T., Hoàng N. K., & Mai T. N. (2025). *Nghiên cứu chế tạo nhựa epoxy biến tính bằng thiokol lỏng dùng để sản xuất keo dán trong ngành hàng không*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ nhiệt đới, Số 17, tr. 63-74. <https://doi.org/10.58334/vrtc.jtst.n17.07>

Ngày nhận bài:	17/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	14/01/2026
Ngày duyệt đăng:	20/01/2026