

Nghiên cứu thực nghiệm tính chất cơ học của thanh GFRP và triển vọng ứng dụng trong xây dựng tại Việt Nam

Experimental investigation of mechanical properties of GFRP bars and their application potential in Vietnam

> TS NGUYỄN THỊ NGUYỆT HẰNG, TS HOÀNG CHÍ THÀNH, GS.TS NGUYỄN HOÀNG GIANG*

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: giangnh@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm các tính chất cơ học của thanh cốt composite thủy tinh (GFRP) nhằm đánh giá tiềm năng ứng dụng trong xây dựng tại Việt Nam. Hai loại thanh GFRP có đường kính danh định 13 mm và 19 mm được thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo và mô-đun đàn hồi dọc trục theo Tiêu chuẩn TCVN 11109:2015. Kết quả cho thấy cường độ chịu kéo trung bình đạt khoảng 1.178 MPa đối với thanh D13 và 1.025 MPa đối với thanh D19, trong khi mô-đun đàn hồi tương ứng đạt 45,6 GPa và 41,9 GPa. Quan hệ ứng suất - biến dạng có dạng tuyến tính đến phá hoại với biến dạng cực hạn xấp xỉ 1,3%, phản ánh cơ chế phá hoại giòn đặc trưng của vật liệu composite. Dạng phá hoại xảy ra trong đoạn làm việc, chứng tỏ hệ neo và quy trình thí nghiệm bảo đảm độ tin cậy của kết quả. Trên cơ sở các đặc trưng cơ học thu được, bài báo thảo luận ưu điểm và đề xuất các hướng ứng dụng tiềm năng của GFRP trong các cấu kiện bê tông làm việc trong môi trường xâm thực, công trình ven biển, kết cấu ngầm và các cấu kiện yêu cầu độ bền lâu cao.

Từ khóa: Cốt GFRP; cường độ chịu kéo; quan hệ ứng suất - biến dạng; khả năng kháng ăn mòn; nghiên cứu thực nghiệm.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the mechanical properties of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars to evaluate their potential applications in construction in Vietnam. Two types of GFRP bars with nominal diameters of 13 mm and 19 mm were tested to determine their tensile strength and axial elastic modulus in accordance with TCVN 11109:2015. The results show that the average tensile strengths are approximately 1.178 MPa for D13 bars and 1.025 MPa for D19 bars, while the corresponding elastic moduli are 45.6 GPa and 41.9 GPa. The stress - strain relationship exhibits a nearly linear behavior up to failure, with ultimate strains of about 1.3%, indicating the typical brittle failure mechanism of composite materials. Failure occurred within the gauge length, demonstrating the effectiveness of the anchorage system and the reliability of the test procedure. Based on the obtained mechanical characteristics, the advantages of GFRP bars are discussed, and potential applications in aggressive environments, coastal structures, underground works and durable concrete members are proposed.

Keywords: GFRP bar; tensile strength; stress - strain relationship; corrosion resistance; experimental study.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong điều kiện khí hậu nóng ẩm và môi trường ven biển giàu ion clorua, nhiều công trình bê tông cốt thép tại Việt Nam phải đối mặt với nguy cơ ăn mòn, làm suy giảm khả năng chịu lực và tuổi thọ khai thác. Do đó, việc nghiên cứu các loại vật liệu cốt thay thế có khả

năng kháng ăn mòn tốt là hướng đi cần thiết nhằm nâng cao độ bền lâu và giảm chi phí bảo trì.

Cốt polymer gia cường sợi (FRP), trong đó phổ biến là cốt composite thủy tinh (GFRP), được xem là một trong những giải pháp tiềm năng. Cốt GFRP là vật liệu composite gồm sợi thủy tinh

cường độ cao đóng vai trò chịu lực chính và nhựa nền polymer (thường là vinyl ester hoặc epoxy) có chức năng liên kết, truyền lực giữa các sợi và bảo vệ khỏi tác động môi trường. Nhờ cấu trúc định hướng sợi dọc trục, cốt GFRP đạt cường độ kéo rất cao trong khi khối lượng riêng chỉ khoảng 1/4 thép, tạo nên tỷ số cường độ trên trọng lượng vượt trội [1]. Ngoài ra, GFRP không bị ăn mòn điện hóa, có tính kháng hóa chất và muối tốt, đồng thời không nhiễm từ và không dẫn điện như cốt thép thông thường, nên đặc biệt phù hợp cho công trình ven biển, môi trường xâm thực hoặc các kết cấu yêu cầu tính điện môi [2-4].

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu và hướng dẫn thiết kế đã khẳng định tiềm năng ứng dụng của bê tông cốt GFRP trong công trình ven biển, thủy công và kết cấu ngầm [5-7]. Tuy nhiên, do đặc trưng cơ học phụ thuộc vào thành phần vật liệu và quy trình chế tạo, cùng với mô-đun đàn hồi thấp và cơ chế phá hoại giòn so với thép [8, 9], việc xác định thực nghiệm các thông số cơ học cụ thể là cần thiết trước khi ứng dụng. Tại Việt Nam, dữ liệu thí nghiệm về thanh GFRP thương mại còn hạn chế, chưa đủ để làm cơ sở cho thiết kế và định hướng ứng dụng rộng rãi [10]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tiến hành thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo và mô-đun đàn hồi dọc trục của hai loại thanh GFRP đường kính 13 mm và 19 mm, nhằm phân tích đặc trưng cơ học và làm cơ sở đánh giá khả năng ứng dụng của vật liệu trong điều kiện xây dựng tại Việt Nam.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

Nghiên cứu sử dụng các thanh GFRP thương mại của FRTech (Hàn Quốc) để thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo và mô-đun đàn hồi theo TCVN 11109:2015 [6]. Hai loại đường kính 13 mm và 19 mm được lựa chọn nhằm đánh giá ảnh hưởng của kích thước đến đặc trưng cơ học. Nội dung cụ thể về chuẩn bị mẫu, thiết bị và quy trình thí nghiệm được trình bày trong các mục sau.

2.1. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Tổng quan chương trình thí nghiệm với hai loại thanh GFRP có đường kính 13 mm và 19 mm được trình bày trong Bảng 1. Với mỗi đường kính, hai nhóm thí nghiệm được tiến hành nhằm xác định cường độ chịu kéo và mô-đun đàn hồi. Mỗi nhóm gồm 3 mẫu, tổng cộng 12 mẫu thí nghiệm. Quy trình chuẩn bị mẫu và thí nghiệm tuân theo TCVN 11109:2015 về cốt composite polyme (Fiber-Reinforced Polymer bar) [6]. Các mẫu thí nghiệm được chuẩn bị và được minh họa trong Hình 1.

Bảng 1. Tóm tắt chương trình thí nghiệm

Loại GFRP	Đường kính danh định, mm	Diện tích danh định, mm ²	Số lượng mẫu thí nghiệm	
			Xác định cường độ chịu kéo	Xác định mô-đun đàn hồi
GFRP D13	12,7	126,67	03	03
GFRP D19	19,1	286,52	03	03



a) - Gắn cảm biến biến dạng và dây dẫn cảm biến cho thí nghiệm mô-đun đàn hồi của GFRP D13
b) - Gắn cảm biến biến dạng và dây dẫn cảm biến cho thí nghiệm mô-đun đàn hồi của GFRP D19
c) - Quá trình gắn cảm biến biến dạng cho thí nghiệm kéo GFRP

Hình 1. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Như thể hiện ở Hình 1, hai đầu thanh GFRP được neo trong ống thép đường kính 42 mm và lấp đầy bằng vữa không co ngót SikaGrout 214-11 để bảo đảm truyền lực dọc trục ổn định. Chiều dài neo mỗi đầu lần lượt là 350 mm (đối với thanh D13) và 450 mm (đối với thanh D19), tuân theo TCVN 11109:2015. Giải pháp này giúp phân bố đều ứng suất và hạn chế phá hoại sớm tại vị trí kẹp, bảo đảm phá hoại xảy ra trong đoạn làm việc của thanh. Ngoài ra, cảm biến đo biến dạng được dán tại vùng giữa mẫu, cách xa đầu neo nhằm ghi nhận biến dạng kéo thuần túy. Việc căn chỉnh thẳng trục mẫu và cố định vị trí thanh trong quá trình đổ vữa được kiểm soát để hạn chế mô-men uốn phụ ảnh hưởng đến kết quả xác định mô-đun đàn hồi.

2.2. Thiết bị và quy trình thí nghiệm

Mẫu GFRP sau khi neo hai đầu được lắp vào máy kéo có tải trọng cực đại 100 tấn (Hình 2). Trục thanh được căn chỉnh trùng với phương lực tác dụng để bảo đảm trạng thái kéo dọc trục thuần túy. Mặc dù máy kéo có khả năng chịu tải đến 100 tấn, các thí nghiệm trong nghiên cứu này được thực hiện trên thang đo lực 25 tấn nhằm tăng độ chính xác và độ nhạy của hệ đo trong quá trình gia tải.



a) - Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo GFRP



b) - Thí nghiệm xác định mô-đun đàn hồi

Hình 2. Bố trí mẫu thí nghiệm

Ở thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo (Hình 2a), tải trọng được tăng dần từ 0 cho đến giá trị tải trọng phá hoại (P). Cường độ bền khi kéo của thanh GFRP thí nghiệm sẽ được xác định:

$$\sigma_u = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Trong đó: P - Tải trọng phá hoại (N); A - Diện tích ngang của tiết diện (mm²).

Ở thí nghiệm xác định mô-đun đàn hồi khi kéo, E_f (MPa) được tính bằng tỉ số gia tải trọng khi kéo trong khoảng 0,2P đến 0,5P và biến dạng theo công thức:

$$E_f = \frac{P_1 - P_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)A} \quad (2)$$

Trong đó: P₁ - Tải trọng, bằng (50 ± 2)% tải trọng phá hoại, N; P₂ - Tải trọng, bằng (20 ± 2)% tải trọng phá hoại, N; ε₁ - Biến dạng tương ứng với tải trọng P₁ và ε₂ - Biến dạng tương ứng với tải trọng P₂. Độ dãn dài tương ứng với tải trọng phá hoại được tính theo công thức:

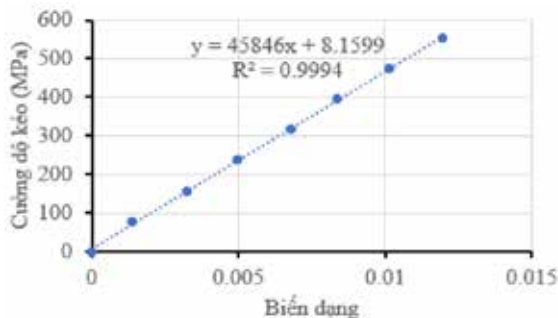
$$\varepsilon_u = \frac{P}{E_f A} \quad (3)$$

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

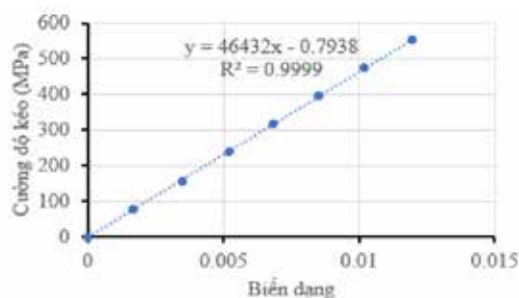
Kết quả thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo và mô-đun đàn hồi của các thanh GFRP được trình bày trong Bảng 2, trong khi quan hệ ứng suất - biến dạng và dạng phá hoại được thể hiện tương ứng ở Hình 3 và Hình 4. Nhìn chung, các kết quả thu được từ thí nghiệm phản ánh rõ đặc trưng cơ học điển hình của vật liệu composite sợi thủy tinh.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm

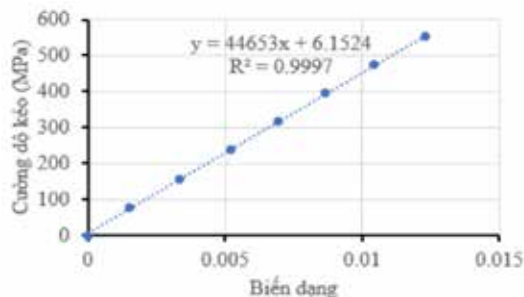
		Lực kéo đứt (kN)	Giới hạn bền kéo (MPa)	Độ giãn dài (%)	Mô-đun đàn hồi dọc trục khi kéo (GPa)
GFRP D13	GFRP D13-1	150	1.184		
	GFRP D13-2	146	1.152		
	GFRP D13-3	152	1.199		
	GFRP D13-4			1,33	45,85
	GFRP D13-5			1,28	46,43
	GFRP D13-6			1,31	44,65
Giá trị trung bình		149,3	1.178,3	1,31	45,64
Hệ số biến thiên (CoV)		2,05%	2,04%	1,93%	1,98%
GFRP D19	GFRP D19-1	292	1.019		
	GFRP D19-2	295	1.029		
	GFRP D19-3	294	1.026		
	GFRP D19-4			1,29	43,93
	GFRP D19-5			1,33	37,98
	GFRP D19-6			1,34	43,71
Giá trị trung bình		293,7	1.024,7	1,32	41,87
Hệ số biến thiên (CoV)		0,52%	0,50%	2,01%	8,05%



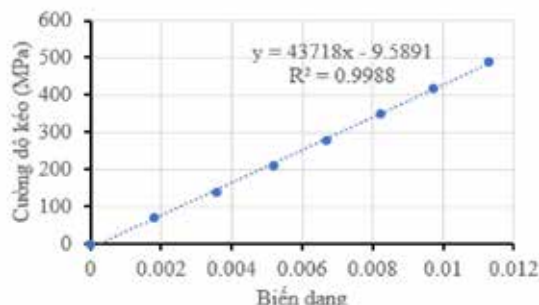
a) - GFRP D13-4



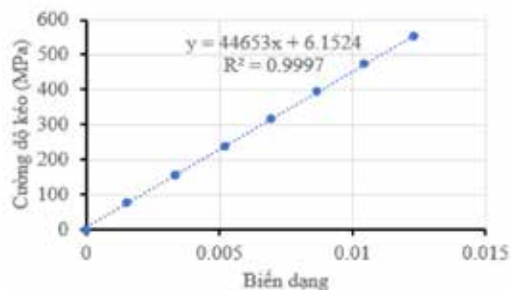
b) - GFRP D13-5



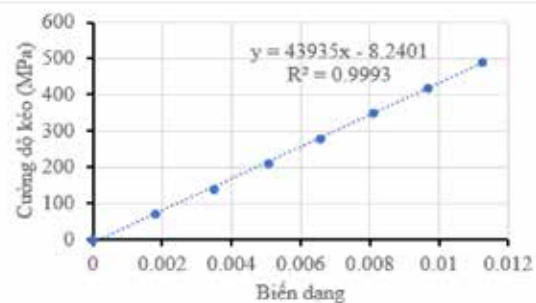
c) - GFRP D13-6



d) - GFRP D19-4



e) - GFRP D19-5



f) - GFRP D19-6

Hình 3. Biểu đồ ứng suất - biến dạng của GFRP trong thí nghiệm mô-đun đàn hồi



Hình 4. Dạng phá hoại của GFRP trong thí nghiệm kéo đứt

3.1. Cường độ chịu kéo

Đối với nhóm mẫu GFRP D13, lực kéo đứt trung bình đạt 149,3 kN, tương ứng giới hạn bền kéo trung bình 1.178,3 MPa. Nhóm GFRP D19 có lực kéo đứt trung bình 293,7 kN và giới hạn bền kéo trung bình 1.024,7 MPa. Mặc dù thanh D19 có tiết diện lớn hơn và tải phá hoại cao hơn, giá trị cường độ kéo tính theo ứng suất lại thấp hơn so với D13. Điều này cho thấy ảnh hưởng của kích thước tiết diện và cấu trúc sợi đến hiệu quả chịu lực của vật liệu, phù hợp với xu hướng đã được ghi nhận đối với cốt FRP [11], trong đó sự phân bố sợi và mức độ đồng nhất của vật liệu có thể thay đổi theo đường kính thanh.

3.2. Mô-đun đàn hồi và quan hệ ứng suất - biến dạng

Mô-đun đàn hồi trung bình của GFRP D13 và D19 lần lượt là 45,64 GPa và 41,87 GPa. Các đường cong ứng suất - biến dạng (Hình 3) gần như tuyến tính đến phá hoại, cho thấy vật liệu làm việc chủ yếu trong miền đàn hồi và không xuất hiện giai đoạn chảy dẻo như thép. Biến dạng cực hạn của hai nhóm xấp xỉ nhau (~1,3%), cho thấy đặc trưng này phụ thuộc chủ yếu vào bản chất sợi hơn là kích thước thanh. Do mô-đun thấp hơn thép, việc sử dụng GFRP có thể dẫn đến độ võng và bề rộng vết nứt lớn hơn ở trạng thái sử dụng.

Hệ số biến thiên (CoV) của các chỉ tiêu cơ học nhìn chung nhỏ (<3%) đối với cả hai nhóm, phản ánh tính đồng đều cao của vật liệu và độ tin cậy của thí nghiệm. Riêng mô-đun đàn hồi của D19 có CoV cao hơn (8,05%), có thể liên quan đến sự không đồng nhất cấu trúc và phân bố sợi trong tiết diện lớn. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng mô-đun đàn hồi của GFRP có thể được cải thiện thông qua tối ưu hóa thành phần và định hướng sợi trong quá trình chế tạo, qua đó mở rộng phạm vi ứng dụng của GFRP.

3.3. Dạng phá hoại

Quan sát sau thí nghiệm (Hình 4) cho thấy tất cả các mẫu đều phá hoại trong đoạn làm việc, không xảy ra hư hỏng tại vùng neo, chứng tỏ hệ neo thép và vữa không có ngót bảo đảm truyền lực hiệu quả. Dạng phá hoại chủ yếu là đứt dọc trực kèm tách lớp sợi - nhựa nền, bề mặt gãy có cấu trúc xơ sợi xòe ra. Việc không ghi nhận biến dạng dẻo trước khi phá hoại, khẳng định đặc trưng giòn của vật liệu GFRP. So với thép, cơ chế phá hoại xảy ra đột ngột, do đó thiết kế cần chú trọng kiểm soát trạng thái sử dụng và hệ số an toàn. Dạng phá hoại tương tự giữa D13 và D19 cho thấy cơ chế hư hỏng phụ thuộc chủ yếu vào bản chất vật liệu hơn là kích thước thanh.

3.4. Nhận xét tổng quan

Kết quả thí nghiệm cho thấy GFRP có cường độ chịu kéo cao (1.178,3 MPa với GFRP D13 và 1.024,7 MPa đối với GFRP D19) và khối lượng riêng nhỏ ($\approx 1.900 \text{ kg/m}^3$ theo thông số từ nhà sản xuất) so với thép thường (khoảng 300 - 500 MPa tùy vào cấp thép và khối lượng riêng khoảng 7.850 kg/m^3), qua đó mang lại tỷ số cường độ trên trọng lượng vượt trội. Tuy nhiên, do mô-đun đàn hồi thấp hơn

thép, cấu kiện bê tông cốt GFRP có thể xuất hiện độ võng và bề rộng vết nứt lớn hơn ở trạng thái sử dụng, vì vậy thiết kế cần ưu tiên kiểm soát trạng thái giới hạn sử dụng. Thêm vào đó, vật liệu làm việc đàn hồi tuyến tính đến phá hoại và có cơ chế hư hỏng giòn, đòi hỏi cách tiếp cận thiết kế an toàn dự phòng. Tuy nhiên, ưu điểm kháng ăn mòn giúp GFRP có tiềm năng lớn trong các công trình hạ tầng làm việc trong môi trường xâm thực tại Việt Nam, đặc biệt khi yêu cầu về tuổi thọ khai thác và chi phí bảo trì ngày càng được đặt lên hàng đầu.

4. ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG CỐT GFRP TRONG XÂY DỰNG TẠI VIỆT NAM

Trên cơ sở các đặc trưng cơ học đã xác định, việc định hướng ứng dụng cốt GFRP trong điều kiện xây dựng tại Việt Nam cần được xem xét theo từng nhóm cấu kiện và điều kiện làm việc cụ thể. Các nội dung sau tập trung phân tích khả năng sử dụng GFRP trong môi trường xâm thực, trong các cấu kiện có yêu cầu độ võng hạn chế và trong kết cấu nền móng - công trình ngầm, đồng thời làm rõ những lưu ý kỹ thuật khi áp dụng trong thực tiễn thiết kế.

4.1. Cốt chịu lực cho kết cấu bê tông trong môi trường xâm thực

Điều kiện khí hậu nóng ẩm cùng môi trường ven biển giàu ion clorua khiến nhiều công trình hạ tầng tại Việt Nam phải đối mặt với nguy cơ ăn mòn cốt thép nghiêm trọng, dẫn đến suy giảm tuổi thọ và gia tăng chi phí bảo trì. Nhờ khả năng kháng ăn mòn điện hóa, GFRP đặc biệt phù hợp cho các cấu kiện bê tông làm việc trong môi trường xâm thực như cống hộp, hầm kỹ thuật, tường chắn và các kết cấu tiếp xúc trực tiếp với nước biển hoặc nước thải. Trên thực tế, GFRP đã bước đầu được nghiên cứu và ứng dụng thí điểm tại một số công trình ven biển ở Việt Nam. Hình 5 minh họa một số ví dụ tiêu biểu, cho thấy xu hướng chuyển dịch sang sử dụng cốt không bị ăn mòn nhằm nâng cao độ bền lâu và tối ưu hóa chi phí vòng đời công trình. Ngoài ra, các cấu kiện như cống hộp và tường chắn thường có chiều dày lớn và ít yêu cầu khắt khe về độ võng, nên ít chịu bất lợi từ mô-đun đàn hồi thấp của GFRP. Việc sử dụng GFRP trong các cấu kiện này góp phần nâng cao độ bền lâu, giảm chi phí sửa chữa và phù hợp với định hướng phát triển hạ tầng bền vững.



a) - GFRP cho công trình mặt đường tại cảng Lạch Huyện, Hải Phòng



b) - Cừ bê tông cốt GFRP tại Rừng Dương - Vũng Tàu

Hình 5. Hình minh họa các dạng công trình ven biển có tiềm năng ứng dụng GFRP

4.2. Ứng dụng trong các cấu kiện có biến dạng nhỏ

Do mô-đun đàn hồi của GFRP thấp hơn thép, việc sử dụng vật liệu này hiệu quả hơn trong các cấu kiện có biến dạng nhỏ trong quá trình khai thác. Một ví dụ điển hình là kết cấu bản đường ray không đá ballast trong đường sắt đô thị hoặc đường sắt tốc độ cao (slab track). Các bản slab track có chiều dày lớn, được đỡ liên tục bởi nền hoặc kết cấu phụ trợ, do đó độ võng tương đối nhỏ và điều kiện làm việc phù hợp với đặc tính của GFRP.

Bên cạnh đó, các cấu kiện bản móng và bản sàn đặt trực tiếp trên nền đất, chẳng hạn như sàn trên nền đất (slab-on-ground) và mặt đường bê tông (concrete pavement), các tấm tà vẹt trong kết cấu đường sắt hoặc các cấu kiện tiền chế có chiều cao tiết diện lớn, cũng là những ứng dụng tiềm năng của GFRP. Việc sử dụng GFRP góp phần nâng cao độ bền trong môi trường xâm thực mà không làm gia tăng đáng kể tải trọng bản thân, đồng thời đáp ứng yêu cầu về tuổi thọ thiết kế dài và chi phí bảo trì thấp.

4.3. Ứng dụng trong kết cấu nền móng và công trình ngầm

Kết quả nghiên cứu cho thấy GFRP có cường độ kéo cao và khả năng kháng môi trường tốt [2, 4], do đó có tiềm năng ứng dụng trong các cấu kiện nền móng và công trình ngầm - nơi cốt thép truyền thống thường chịu tác động bất lợi của nước ngầm, đất xâm thực hoặc môi trường hóa học. Các cấu kiện như cọc cừ bê tông, tường vây móng, bản đáy hầm hoặc móng nông trong khu vực đất nhiễm mặn là những trường hợp có thể hưởng lợi từ việc sử dụng GFRP.

Trong các cấu kiện này, nội lực thường được phân bố theo dạng nén - uốn với độ võng hạn chế, do đó yêu cầu về độ cứng không quá khắt khe như trong các dầm nhịp lớn. Ưu điểm về kháng ăn mòn và độ bền lâu của GFRP có thể mang lại hiệu quả kinh tế vòng đời rõ rệt, đặc biệt đối với các công trình khó tiếp cận để bảo trì hoặc sửa chữa.

4.4. Các lưu ý kỹ thuật khi ứng dụng

Kết quả thí nghiệm cho thấy GFRP có mô-đun đàn hồi thấp hơn thép và phá hoại theo cơ chế giòn, không có giai đoạn chảy dẻo trước khi mất khả năng chịu lực. Điều này ảnh hưởng trực tiếp đến ứng xử cấu kiện bê tông cốt GFRP, đặc biệt ở trạng thái giới hạn sử dụng, khi độ cứng uốn có thể giảm và độ võng, bề rộng vết nứt tăng nhanh hơn dưới cùng mức tải khai thác. Vì vậy, thiết kế cần ưu tiên kiểm soát biến dạng và bề rộng vết nứt thay vì chỉ dựa vào cường độ cực hạn.

Do không có khả năng phân phối lại nội lực thông qua biến dạng dẻo, GFRP đòi hỏi cách tiếp cận thiết kế theo quan điểm an toàn dự phòng, trong đó ứng suất làm việc phải được giới hạn thấp hơn đáng kể so với cường độ phá hoại. Hiệu quả chịu lực của cấu kiện còn phụ thuộc chặt chẽ vào khả năng bám dính giữa thanh GFRP và bê tông. Trên thực tế, các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành, như ACI 440.1-22 đã nội hàm hóa các yêu cầu này thông qua hệ thống hệ số giảm và điều chỉnh tương đối nghiêm ngặt (ví dụ hệ số môi trường khoảng 0,85; hệ số giảm cường độ kéo 0,55 - 0,65; hệ số suy giảm do từ biến 0,3), qua đó bảo đảm mức dự phòng an toàn cao và độ tin cậy lâu dài của kết cấu trong các điều kiện khai thác khác nhau.

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm xác định cường độ chịu kéo và mô-đun đàn hồi của hai loại thanh GFRP đường kính danh định 13 mm và 19 mm theo TCVN 11109:2015. Kết quả cho thấy cường độ trung bình đạt 1.178 MPa (D13) và 1.025 MPa (D19), trong khi mô-đun đàn hồi tương ứng là 45,6 GPa và 41,9 GPa. Quan hệ ứng suất - biến dạng tuyến tính đến phá hoại với biến dạng cực hạn khoảng 1,3%, thể hiện đặc trưng đàn hồi - giòn của vật liệu.

Dạng phá hoại là đứt sợi dọc trực kèm tách lớp sợi - nhựa nền xảy ra trong đoạn làm việc thay vì tại đầu neo, cho thấy hệ neo và

quy trình thí nghiệm bảo đảm truyền lực hiệu quả. Độ phân tán giữa các mẫu nhỏ, khẳng định độ tin cậy của kết quả.

Các kết quả này cho thấy GFRP có hiệu suất chịu kéo cao nhưng mô-đun thấp hơn thép và phá hoại giòn, do đó thiết kế kết cấu bê tông cốt GFRP cần đặc biệt chú trọng kiểm soát độ võng, bề rộng vết nứt và lựa chọn hệ số an toàn phù hợp.

Với khả năng kháng ăn mòn cao và tính ổn định trong môi trường xâm thực, GFRP thể hiện tiềm năng ứng dụng trong các cấu kiện làm việc tại khu vực ven biển, công trình thoát nước, kết cấu ngầm và nền móng. Vật liệu này đặc biệt phù hợp với các cấu kiện không đặt yêu cầu nghiêm ngặt về kiểm soát độ võng, chẳng hạn như cống hộp, bản sàn và tà vẹt đường sắt hoặc mặt đường bê tông. Việc sử dụng GFRP trong các trường hợp này góp phần nâng cao độ bền lâu, giảm chi phí bảo trì và cải thiện hiệu quả vòng đời công trình, qua đó phù hợp với định hướng phát triển hạ tầng bền vững tại Việt Nam.

Lời cảm ơn: Phần thí nghiệm của nghiên cứu này được thực hiện tại Phòng thí nghiệm và kiểm định công trình LAS-XD24.125, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ của các cán bộ Phòng thí nghiệm trong quá trình chuẩn bị và tiến hành thí nghiệm. Đồng thời, nhóm tác giả xin cảm ơn Công ty FRTech (Hà Nội) đã cung cấp mẫu vật liệu phục vụ chương trình thí nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kocaoz, S., V. A. Samaranayake and A. Nanni. Tensile characterization of glass FRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), p. 127-134, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.05.004>.
- [2] Sun, Yanan, Zuquan Jin, Fengyin Du, Langni Deng, Bo Pang, Lin Yang and Shicai Li. High performance glass fiber reinforced polymer bars for marine engineering: A synergistic approach using microwave-assisted nanomaterial functionalization and organosilicon modification. *Construction and Building Materials*, 493, p. 143119, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143119>.
- [3] Sun, Yanan, Zuquan Jin, Xiaoying Zhang, Shouqi Zhang, Song He and Bo Pang. Initial stage degradation of GFRP bars based on functional group ratio change using FTIR in high temperature and alkaline solution. *Journal of Building Engineering*, 68, p. 106190, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106190>.
- [4] Benmokrane, Brahim, Salaheldin Mousa, Khaled Mohamed and Mahmoud Sayed-Ahmed. Physical, mechanical, and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*, 276, p. 122200, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122200>.
- [5] CODE-440.11-22, ACI. Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars-Code and Commentary. *American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA*, 2022.
- [6] 11109:2015, TCVN. CỐT COMPOSÍT POLYME. *Bộ Khoa học và Công nghệ: Hanoi, Vietnam*, 2015.
- [7] João R. Correia, Thomas Keller, Jan Knippers, J. Toby Mottram, Carlo Paulotto, José Sena-Cruz, Luigi Ascione. CEN/TS 19101: 2022 - Design of Fibre-Polymer Composite Structures. *CRC Press*, 2022.
- [8] Alajarmeh, Omar, Allan Manalo and Dmitry Yatsenko. High elastic modulus GFRP rebar: A guide to manufacture and design of the influencing parameters. *Composites Part C: Open Access*, 16, p. 100576, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100576>.
- [9] Seo, Dong-Woo, Ki-Tae Park, Young Jun You and Hyeong-Yeol Kim. Enhancement in Elastic Modulus of GFRP Bars by Material Hybridization. *Engineering*, 05, pp. 865-869, 2013, doi: <https://doi.org/10.4236/eng.2013.511105>.
- [10] Nguyễn Anh Tuấn, Đào Quang Huy, Phạm Ngọc Trường. Thí nghiệm nghiên cứu khả năng dính bám giữa cốt thanh GFRP và bê tông trong đầm. *Tạp chí Xây dựng*, số tháng 6, tr. 434-437, 2025.
- [11] Benmokrane, Brahim, Allan Manalo, Jean-Charles Bouhet, Khaled Mohamed and Mathieu Robert. Effects of Diameter on the Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars Conditioned in Alkaline Solution. *Journal of Composites for Construction*, 21, 2017, doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000814](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000814).