

# XÁC ĐỊNH ĐẶC TÍNH VẬT LIỆU PFRP BẰNG PHƯƠNG PHÁP UỐN BA ĐIỂM

## MATERIAL CHARACTERIZATION OF PFRP BY THREE-POINT BENDING METHOD

Nguyễn Tiến Thủy

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh  
thuy.nguyen@ut.edu.vn

**Tóm tắt:** Được sản xuất bằng phương pháp “đúc kéo”, vật liệu polyme gia cường sợi Pultruded Fiber Reinforced Polymer (PFRP) có tiết diện tương tự kết cấu thép, với tính chất và ứng xử vượt trội như trọng lượng nhẹ, cường độ cao, khả năng kháng môi, chống ăn mòn tốt, do đó ngày càng được sử dụng trong nhiều công trình xây dựng qua những thập kỷ gần đây. Để nghiên cứu ứng xử của vật liệu PFRP dưới các điều kiện tải trọng khác nhau, phục vụ cho việc hoàn thiện tiêu chuẩn thiết kế, các hằng số đàn hồi là dữ liệu cơ bản và rất quan trọng. Nghiên cứu này trình bày phương pháp xác định modun uốn và modun cắt bằng phương pháp uốn ba điểm dựa theo BS EN 13706-2. Kết quả cho thấy phương pháp này đạt kết quả ổn định và thuộc vùng các giá trị phổ biến khi so sánh với các kết quả thí nghiệm khác. Tác giả đề xuất sử dụng phương pháp này song song với các thí nghiệm vật liệu khác nhằm xác định giá trị modun đàn hồi có độ tin cậy cao của vật liệu PFRP.

**Từ khóa:** Modun đàn hồi; Modun cắt; BS EN; Hệ số modun toàn phần.

**Mã phân loại:** 11.2

**Abstract:** Manufactured by a continuous composite process known as “pultrusion”, the pultruded fiber reinforced polymer (PFRP) have the similar shapes as of steel with advanced properties and behaviours such as: lightweight, high strength, high fatigue resistance, corrosion resistance, etc. The application of PFRP shapes and system in construction is growing in the last couple of decades. To deeply understand the behaviour of PFRP under different loading condition to support a design code for this material, it is crucial to obtain knowledge of its material properties. This research presents a simple method to approximate the elastic moduli using three point bending. It is found that this approach provides a relatively reliable result that lie within the popular range of the value comparing to those obtained from previous studies. The author suggests this method to be adopted alongside with other material test methods to have a better and reliable approximation of the moduli of PFRP material.

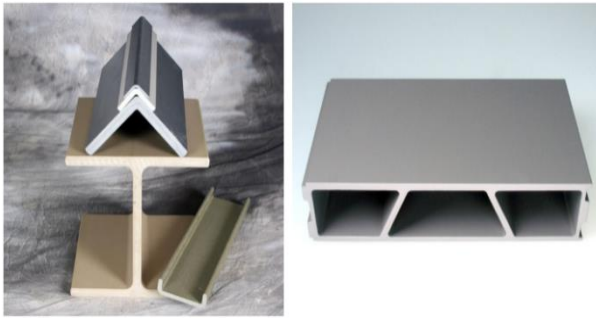
**Keywords:** Elastic modulus; Shear modulus; BS EN; Full-section properties.

**Classification code:** 11.2

### 1. Giới thiệu

Việc sử dụng vật liệu polyme gia cường sợi Pultruded Fiber Reinforced Polymers (PFRP) vào lĩnh vực kết cấu xây dựng đòi hỏi sự hiểu biết về các hằng số đàn hồi (modun uốn, modun cắt, hệ số nở ngang...). Được chế tạo bằng quy trình sản xuất composite liên tục, vật liệu PFRP được tạo thành từ các lớp sợi thủy tinh (hoặc sợi các bon) đơn hướng chạy dọc theo chiều dài cấu kiện và các lớp thấm sợi với các chùm sợi vuông góc, xếp xen kẽ trong khuôn đúc sẵn (thường là các khuôn tiết diện kết cấu phổ biến như chữ I,

chữ C, chữ nhật,...). Các kiến trúc sợi này được đưa vào hệ thống gia nhiệt, ở đó keo nhiệt rắn được đổ vào để hình thành nên các tiết diện như hình 1. Phương pháp sản xuất đặc biệt này tạo nên vật liệu PFRP có đặc trưng cơ lý khác nhau theo các phương khác nhau, do đó phương pháp xác định các hằng số đàn hồi cũng khác so với các vật liệu phổ biến hiện nay. Về cơ bản, PFRP có thể được xem là vật liệu trục hướng, với các tính chất vật liệu trên các hướng vuông góc sẽ khác nhau, trong đó tính chất theo phương dọc trục là quan trọng nhất.



Hình 1. Các tiết diện PFRP phổ biến.

Các hằng số đàn hồi, cụ thể ở đây là modun uốn ( $E$ ) và modun cắt ( $G$ ), thể hiện độ cứng đặc trưng của vật liệu, cùng với độ cứng hình học (momen quán tính  $I$ , momen quán tính xoắn  $J$ ) tạo nên độ cứng tổng thể của cấu kiện. Các hằng số đàn hồi này có thể là của toàn tiết diện (full-section properties), hoặc là các hằng số của vật liệu (xác định qua thí nghiệm kéo hoặc nén mẫu). Trong nhiều trường hợp hoặc đối với một số loại vật liệu đồng tính đẳng hướng, các hằng số có giá trị tương đối gần nhau. Với vật liệu trực hướng như gỗ hay PFRP, những hằng số có thể khác biệt tương đối lớn. Bài báo trình bày thí nghiệm xác định hằng số toàn tiết diện bằng phương pháp uốn ba điểm và so sánh với kết quả của các nghiên cứu khác nhằm tìm kiếm những phương pháp xác định tính chất vật liệu phù hợp cho PFRP sử dụng trong thiết kế.

## 2. Phương pháp uốn ba điểm

Modun đàn hồi của vật liệu composite như PFRP có thể được xác định theo phương pháp A, phụ lục G, tiêu chuẩn BS EN 13706-2 [1]. Phương pháp này sử dụng kết quả độ võng trong thí nghiệm uốn ba điểm (tại giữa nhịp) trên một số chiều dài nhịp khác nhau. Khi lực  $P$  tác dụng tại giữa nhịp dầm giản đơn có chiều dài  $L$ , công thức tính độ võng tại giữa nhịp  $w$  theo lý thuyết của Timoshenko được trình bày như sau:

$$w = \frac{PL^3}{48EI_y} + \frac{PL}{4GA_v} \quad (1)$$

Trong đó,  $I_y$  là momen quán tính quanh trục  $y$  (trục chính),  $A_v = \beta_s A$  là diện tích phân

bố ứng suất cắt, xác định dựa trên hệ số ứng suất cắt  $\beta_s$  theo lý thuyết dầm Timoshenko.

Với dầm I hoặc dầm C chịu uốn qua trục chính, ứng suất cắt phân bố chủ yếu trên bản bụng dầm. Diện tích phân bố ứng suất cắt có thể được đơn giản xem là phần diện tích bản bụng. Các nghiên cứu của Bank [2] và Omidvar [3] đưa ra phương pháp tính chính xác phần diện tích này. Tuy nhiên, tác giả nhận thấy kết quả tính toán có sai khác rất nhỏ so với cách tính đơn giản và hoàn toàn có thể bỏ qua (chẳng hạn với diện tích dầm I, khác biệt  $< 1.5\%$ ). Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp xấp xỉ đơn giản.

Từ công thức (1), chia hai vế cho  $PL$  hoặc  $PL^3$ , ta có:

$$\frac{w}{PL} = \frac{1}{48EI_y} L^2 + \frac{1}{4GA_v} \quad (2)$$

$$\frac{w}{PL^3} = \frac{1}{4GA_v} \frac{1}{L^2} + \frac{1}{48EI_y} \quad (3)$$

Công thức (2) và (3) đều có dạng của phương trình tuyến tính bậc một. Có thể thấy rằng hệ số góc trong công thức (2) chính là giao tuyến trong công thức (3) và ngược lại. Do đó, mỗi đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa  $w/PL$  và  $L^2$  hoặc  $w/PL^3$  và  $1/L^2$  đều có thể dùng để xác định  $EI$  và  $GA_v$ .

Phương pháp xác định modun đàn hồi theo BS EN 13706-2 [1] yêu cầu các kết quả thí nghiệm uốn ba điểm trên năm chiều dài nhịp dầm bao gồm chiều dài tối hạn  $L_c$  - chiều dài nhịp biến dạng do cắt chiếm 12% tổng biến dạng của dầm. Từ công thức (1), biến dạng do cắt là  $PL/(4G_{LT}A_v)$ , biến dạng do uốn là  $PL^3/(48E_L I_y)$ . Khi biến dạng do cắt chiếm 12%, nghĩa là:

$$\frac{12}{100} = \frac{PL_c}{4G_{LT}A_v} = \frac{12E_L I_y}{L_c^2 G_{LT} A_v} \quad (4)$$

$$L_c = \sqrt{100E_L I_y / (G_{LT} A_v)} = 10\sqrt{\kappa_F / \kappa_S} \quad (4)$$

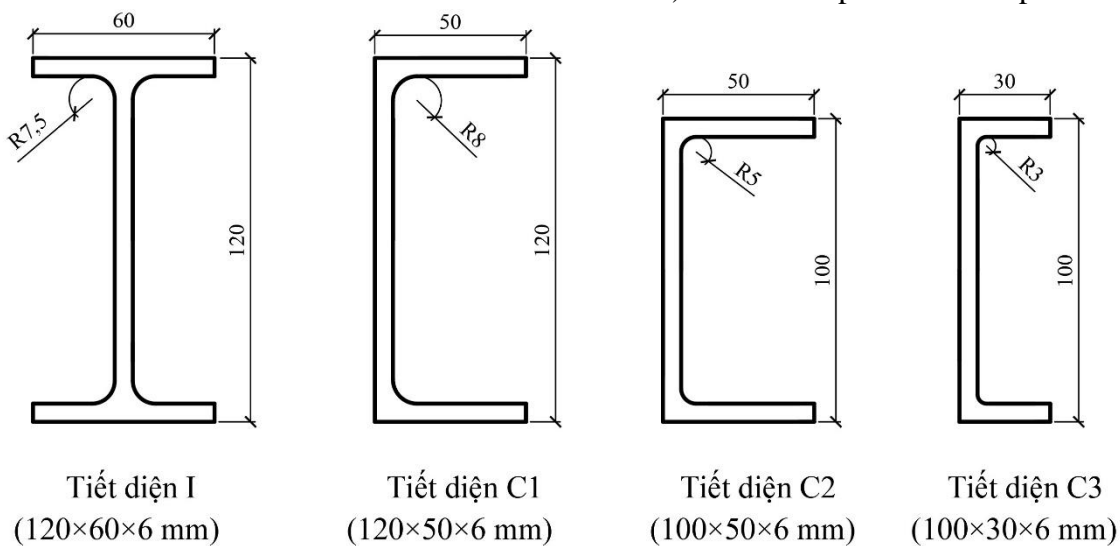
Trong đó  $\kappa_F$  là độ cứng kháng uốn ( $\kappa_F = E_L I_y$ ) và  $\kappa_S$  là độ cứng kháng cắt  $\kappa_S = G_{LT} A_v$ .

### 3. Thí nghiệm và phân tích kết quả

Các thí nghiệm về ổn định xoắn ngang theo [4] là thí nghiệm uốn ba điểm với tải trọng tác dụng tại giữa nhịp, phù hợp với yêu cầu của phương pháp này. Mặc dù, thí nghiệm kết thúc do sự mất ổn định xoắn ngang, nhưng trong các bước gia tải đầu tiên dầm vẫn ở trạng thái ổn định và chỉ chịu uốn trong mặt phẳng,

vì vậy, có thể sử dụng số liệu của những bước gia tải đó.

Các nhịp dầm xét có chiều dài 1818, 2438, 2844, 3454 và 4064 mm với các tiết diện dầm khác nhau. Kích thước danh định của các tiết diện cung cấp bởi công ty Fiberline Composites A/S, được thể hiện trên hình 2 với một tiết diện chữ I và ba tiết diện chữ C được đặt tên C1, C2, C3. Trong sổ tay thiết kế của Fiberline [5] và thông tin của nhà sản xuất tại <http://www.fiberline.com>, bốn tiết diện này có hằng số đàn hồi (sử dụng trong thiết kế) là  $E = 23$  Gpa và  $G = 3$  Gpa.



**Hình 2.** Kích thước tiết diện I và C.

**Bảng 1.** Kích thước tiết diện I và C.

Tên	Kích thước (mm)	$I_y$ (mm <sup>4</sup> )	$A_v$ (mm <sup>2</sup> )	$L_c$ (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
I	120 × 60 × 6	$2.97 \times 10^6$	684	1830
C1	120 × 50 × 6	$2.58 \times 10^6$	684	1700
C2	100 × 50 × 6	$1.66 \times 10^6$	564	1500
C3	100 × 30 × 6	$1.14 \times 10^6$	564	1250

Bảng 1 cung cấp số liệu về đặc trưng hình học và các chiều dài nhịp tới hạn  $L_c$  của các tiết diện xét. Có thể thấy rằng, chiều dài nhịp sử dụng trong nghiên cứu này không hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu của BS EN 13706-2 (ví dụ, phải có các nhịp ngắn và dài hơn  $L_c$ ). Tuy nhiên, BS EN 13706-2 không đề cập đến sự

ảnh hưởng của chiều dài nhịp tới độ tin cậy của kết quả. Trong phạm vi nghiên cứu này, tạm chấp nhận giả thiết ảnh hưởng của chiều dài nhịp tới độ tin cậy của kết quả là không cao. Bảng 2 tổng hợp các giá trị  $w/PL$  lấy từ kết quả thí nghiệm ổn định xoắn ngang [6] khi dầm vẫn ở trạng thái uốn trong mặt phẳng với

góc xoay tại giữa dầm là rất nhỏ ( $\phi < 0.5^\circ$ ). Cột (1) trong bảng là tên các tiết diện, cột (2) - (6) là giá trị  $w/PL$  với các chiều dài nhịp từ ngắn nhất  $L = 1828$  mm đến dài nhất  $L = 4064$  mm. Từ số liệu tại bảng 2, có thể vẽ bốn đồ thị mối quan hệ giữa  $w/PL$  với  $L^2$ , thể hiện trên hình 3 đối với dầm I và C1, hình 4 đối với dầm C2 và C3. Các số liệu thí nghiệm được thể hiện bằng các điểm hình tròn đặc trên đồ thị (năm số liệu). Đường thẳng trên đồ thị được xác định bằng phương pháp hồi quy tuyến tính.

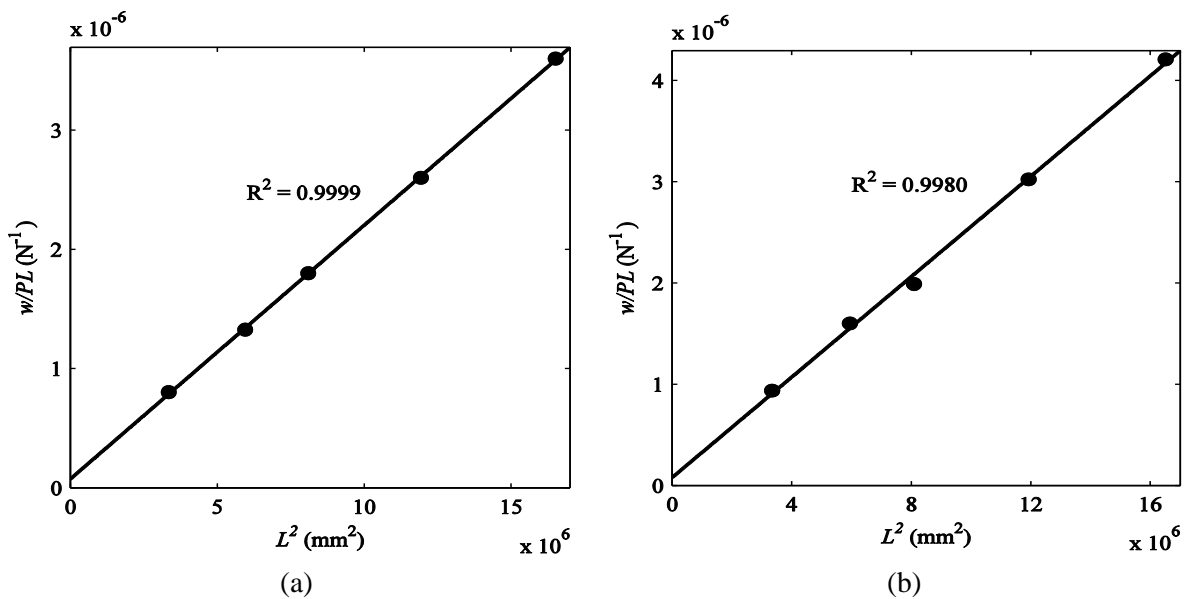
**Bảng 2.** Dữ liệu  $w/PL$  từ thí nghiệm.

Span (mm)	1828	2438	2844	3454	4064
$w/PL (1/N) \times 10^{-6}$					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
I	0.801	1.33	1.80	2.60	3.60
C1	0.937	1.60	1.99	3.02	4.21
C2	1.25	2.42	3.40	4.76	6.35
C3	2.21	3.40	4.60	7.10	-

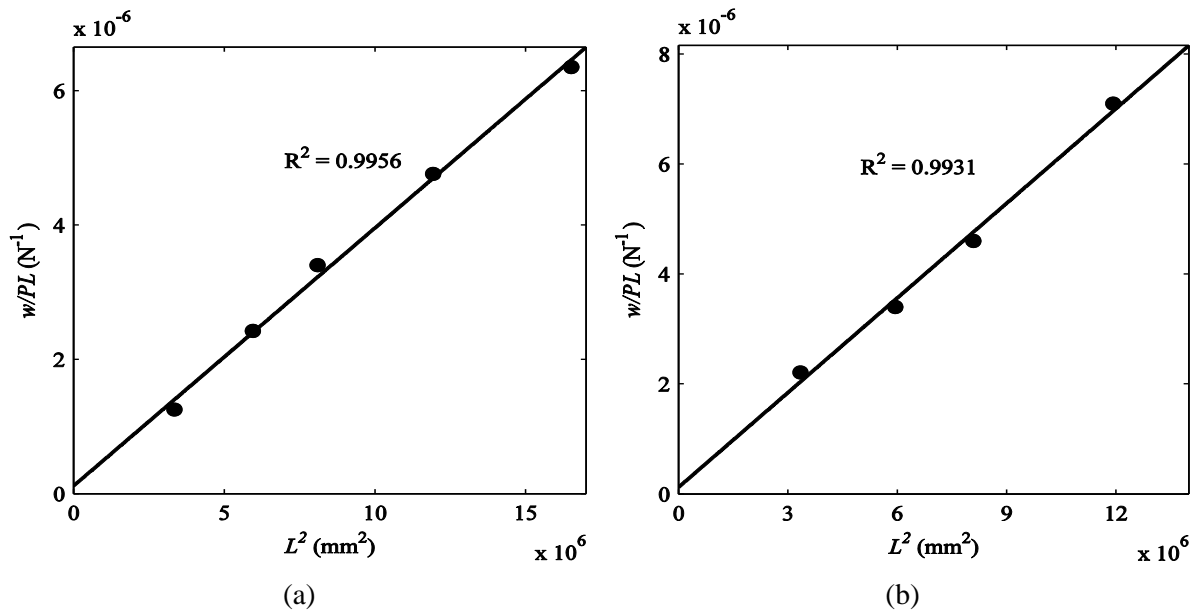
Giá trị bình phương hệ số tương quan  $R^2 \approx 1$  của các đồ thị trên hình 3 và 4, cho thấy sự phù hợp rất cao (gần như tuyệt đối) giữa số liệu thí nghiệm và đường xu hướng tuyến tính. Từ phân tích hồi quy tuyến tính, kết quả xác định modun đàn hồi của tiết diện I và C dựa

trên giá trị của hệ số góc và giao tuyến ở bốn đồ thị trong hình 3 và 4, thể hiện tại bảng 3. Có thể thấy rằng, giá trị modun đàn hồi  $E$  dao động 31.9 - 33.0 Gpa cho cả bốn tiết diện xét là khá ổn định với chênh lệch không cao. Trong khi giá trị modun cắt  $G$  dao động từ 3.5 GPa đến 4.8 GPa với biên độ khác biệt tương đối lớn. Điều này chỉ ra giao tuyến trong đồ thị “rất nhạy” với sự thay đổi của hệ số góc. Một thay đổi nhỏ ở hệ số góc sẽ tạo ra khác biệt lớn ở giao tuyến [7].

So sánh với giá trị danh định cung cấp bởi nhà sản xuất trong sổ tay thiết kế [5] là  $E = 23$  GPa và  $G = 3$ GPa, kết quả thí nghiệm cao hơn tương đối nhiều (39 - 44% đối với  $E$  và 17 - 60% đối với  $G$ ). Lưu ý rằng, giá trị danh định cung cấp bởi nhà sản xuất thường nhỏ hơn thực tế để đảm bảo việc sử dụng trong tính toán thiết kế cho kết quả an toàn hơn, đặc biệt khi FRP là vật liệu có tính biến thiên về tính chất cơ lý tương đối lớn. Trên thực tế, modun đàn hồi ở các bản cánh khác nhau (ví dụ với dầm I) là khác nhau có thể tới 10-20% [6]. Để so sánh chính xác hơn, tác giả đã tổng hợp các kết quả giá trị modun đàn hồi và modun cắt từ nhiều nghiên cứu và sổ tay thiết kế của các nhà sản xuất trong bảng 4.



**Hình 3.** Đồ thị mối quan hệ giữa  $w/PL$  và  $L^2$  của (a) dầm I; (b) dầm C1.



**Hình 4.** Đồ thị mối quan hệ giữa  $w/PL$  và  $L^2$  của (a) dầm C2; (b) dầm C3.

**Bảng 3.** Modun đàn hồi của tiết diện I và C.

Tiết diện	Gradient $\frac{1}{48EI_y}$ (1/N.mm <sup>2</sup> )	Intercept $\frac{1}{4G_{LT}A_v}$ (1/N)	$E$ (GPa)	$G$ (GPa)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
I	$2.13 \times 10^{-13}$	$7.60 \times 10^{-8}$	33.0	4.8
C1	$2.48 \times 10^{-13}$	$8.04 \times 10^{-8}$	32.6	4.5
C2	$3.84 \times 10^{-13}$	$1.18 \times 10^{-7}$	32.5	3.8
C3	$5.74 \times 10^{-13}$	$1.26 \times 10^{-7}$	31.9	3.5

**Bảng 4.** Tổng hợp modun uốn và modun cắt từ các nghiên cứu trên thế giới

Tác giả	Nhà sản xuất	Tiết diện	$E$ (GPa)	PP thí nghiệm	$G$ (Gpa)	PP thí nghiệm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Fiberline	Fiberline, Denmark	Nhiều loại	23-28	-	3.0	-
Creative Pultrusions	Creative Pultrusions Inc., USA.	Nhiều loại	17.2-20.7	Kéo mẫu	2.9	Uốn 3 điểm
Strongwell	Strongwell, USA.	Nhiều loại	17.2-17.9	Kéo mẫu	2.9	Uốn 3 điểm
Bank	Creative Pultrusions Inc., USA.	I	-	-	2.4-2.8	Iosipescu
Mottram [8]	Morrison Molded Fiber Glass	I	22.3-22.8	Uốn 3 điểm	1.2-1.3	Uốn 3 điểm

Tác giả	Nhà sản xuất	Tiết diện	E (GPa)	PP thí nghiệm	G (Gpa)	PP thí nghiệm
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Brooks and Turvey [9]	Morrison Molded Fiber Glass	I	19.8-22.4	Uốn 3 điểm	1.4	Uốn 3 điểm
Sonti and Barbero [10]	Creative Pultrusions Inc., USA	I	20.2 (flange) 18.1 (flange)	Kéo mẫu	3.3-3.8 (flange) 3.9-4.5 (web)	Iosipescu and Torsion
Zureick and Scott [11]	Strongwell, USA.	I	16.8-21.9	Kéo mẫu	4.1-4.8	Iosipescu
		Hộp	26.8-30.7		3.9-5.7	
Steffen [12]	Strongwell, USA.	chữ L	19.7-23.7	Nén mẫu	3.5-4.5	Modified (Iosipescu) V-notched beam
Turvey [13]	Strongwell, USA.	Tám GRP	17.3-17.9	Kéo mẫu	3.0-3.6	Torsion
Roberts and Al-Ubaidi [7]	Exel Composites, UK	I	18.9-32.3	Uốn 3 điểm	4.4-4.9	Torsion
Lane [14]	Creative Pultrusions, USA.	I	26 (B cánh) 19 (B bụng)	Mô hình vi cơ học (micromechanical modelling)	3.2 (web) 3.7 (flange)	Mô hình vi cơ học (micromechanical modelling)
Afifi [15]	Creative Pultrusions, USA.	I	22.8(web)	Kéo mẫu	3.4 (web)	Iosipescu
Barros da S. Santos Neto and Lebre La Rovere [16]	CSE Composites, Brazil	I	32.9	Uốn 3 điểm	2.7	uốn 3 điểm
			35.6	Kéo mẫu (D3039)	-	-
Correia et al [17]	Topglass firm, Italy	I	32.8	Kéo mẫu	3.6	Three points bending

Cột (1) – (3) thể hiện tên tác giả (hoặc số tay thiết kế), nhà sản xuất và loại tiết diện. Cột (4) và (6) là các giá trị modun uốn và modun cắt có được từ các phương pháp thí nghiệm tương ứng ở cột (5) và cột (7). Bảng 4 cho thấy một vùng giá trị tương đối rộng của các modun đàn hồi từ 16.8 Gpa đến 35.6 Gpa, trong đó, các giá trị từ các thí nghiệm chủ yếu nằm trong vùng 20 - 30 Gpa. Đối với modun cắt, vùng giá trị này là từ 1.2 đến 5.7 Gpa với đa số các giá trị thực nghiệm là 3 - 5 Gpa.

Sự khác biệt này là do việc phân bố kiến trúc sợi của mỗi nhà sản xuất không giống nhau. Ngoài ra, PFRP là vật liệu dị hướng (thường được coi là trục hướng) nên các phương pháp thí nghiệm khác nhau cho ra các kết quả không tương đồng. Từ bảng 4, cũng có thể thấy các giá trị modun trong thí nghiệm của tác giả nằm trong vùng các giá trị phổ biến và phù hợp.

#### 4. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu trình bày phương pháp xác định modun đàn hồi  $E$  và modun cắt  $G$  toàn tiết diện của vật liệu PFRP theo tiêu chuẩn BS EN 13706-2. Các kết luận được rút ra như sau:

- Đây là phương pháp thí nghiệm đơn giản, dễ áp dụng vào thực tế, đặc biệt trong điều kiện thiếu thiết bị thí nghiệm. Chi thông qua việc sử dụng các kết quả độ võng tại giữa nhịp dầm giản đơn, về cơ bản có thể xác định tương đối chính xác modun uốn và modun cắt;

- Giá trị modun cắt của các tiết diện khi xác định qua thí nghiệm uốn ba điểm có thể khác biệt tương đối lớn do độ nhạy của giao tuyến trên đồ thị là cao. Trong khi modun đàn hồi cho giá trị ổn định hơn;

- Các giá trị modun đàn hồi và modun cắt từ các nghiên cứu cho thấy sự khác biệt lớn với vùng giá trị của modun uốn phổ biến trong khoảng 20 - 30 GPa và modun cắt ở 3 - 5 GPa là phù hợp. Việc sử dụng các giá trị cận trên và dưới là cần thiết đối với vật liệu PFRP;

- Tác giả đề xuất sử dụng phương pháp này song song với các thí nghiệm vật liệu khác để có kết quả xác định modun đàn hồi và modun cắt một cách chính xác và hợp lý nhất, trước khi sử dụng vào thiết kế.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] B. S. EN, (2002), *Reinforced plastic composites- Specification for pultruded profiles-Part 2: Methods of test and general requirements*, 13706-2:2002, 529–547;
- [2] L. C. Bank, (1987), *Shear coefficients for thin-walled composite beams*, *Compos Struct.*, 8(1), 47–61, [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(87\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0263-8223(87)90015-8);
- [3] B. Omidvar, (1998), *Shear coefficient in orthotropic thin-walled composite beams*, *Journal of Composites for Construction*, 2(1), 46–56, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:1\(46\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:1(46));
- [4] T. T. Nguyen, T. M. Chan, and J. T. Mottram, (2014), *Lateral-torsional buckling resistance by testing for pultruded FRP beams under different loading and displacement boundary conditions*, *Compos B Eng.*, 60:306–318, <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.12.025>;
- [5] Anon, (2014), *Fiberline Design Manual*, Middelfart, Denmark;
- [6] N. T. Thuy, (2014), *Lateral-torsional buckling resistance of pultruded fibre reinforced polymer shapes*, Ph.D dissertation, University of Warwick, West Midlands, UK;
- [7] T. M. Roberts and H. Al-Ubaidi, (2002), *Flexural and torsional properties of pultruded fiber reinforced plastic I-profiles*, *Journal of Composites for Construction*, 6(1), 28–34. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:1\(28\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(28));
- [8] J. T. Mottram, (1992), *Lateral-torsional buckling of a pultruded I-beam*, *Composites*, 23(2), 81–92, [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(92\)90108-7](https://doi.org/10.1016/0010-4361(92)90108-7);
- [9] R. J. Brooks and G. J. Thrvey, (1995), *Lateral buckling of pultruded GRP I-section cantilevers*, *Compos. Struct.*, 32(1–4), 203–215, [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)00018-6);
- [10] S. S. Sonti and E. J. Barbero, (1996), *Material characterization of pultruded laminates and shapes*, *Journal of reinforced plastics and composites*, 15(7), 701–717;
- [11] A. Zureick and D. Scott, (1997), *Short-term behavior and design of fiber-reinforced polymeric slender members under axial compression*, *Journal of Composites for Construction*, 1(4), 140–149.
- [12] R. E. Steffen, (1998) *Behavior and design of fiber-reinforced polymeric composite equal-leg single angle struts*, Ph.D dissertation, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia, USA;
- [13] G. J. Turvey, “*Torsion tests on pultruded GRP sheet*”. *Compos. Sci. Technol.*, 58(8), 1343–1351, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00003-7);
- [14] A. Lane, “*An experimental investigation of buckling mode interaction in PERP wide-flange columns*” University of Warwick, 2002.
- [15] A. A. M. Afifi, (2007), *Buckling of stiffened pultruded GRP plates and columns*, Ph.D dissertation, Lancaster University, Lancashire, UK;
- [16] A. Barros da S. Santos Neto and H. Lebre La Rovere, (2007), *Flexural stiffness characterization of fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams*. *Compos. Struct.*, 81(2), 274–

282, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.08.016>;

- [17] J. R. Correia, F. A. Branco, N. M. F. Silva, D. Camotim, and N. Silvestre, (2011), *First-order buckling and post-buckling behaviour of GFRP pultruded beams. Part 1: Experimental study*,

Comput. Struct. 89(21–22), 2052–2064, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.07.005>.

**Ngày nhận bài: 29/06/2021**

**Ngày chuyển phản biện: 02/07/2021**

**Ngày hoàn thành sửa bài: 23/07/2021**

**Ngày chấp nhận đăng: 30/07/2021**