

Tăng cường sức kháng cắt của dầm bê tông không đai gia cường sợi Polypropylene vĩ mô

Nguyễn Thị Ngọc Bích, Nguyễn Thị Ánh, Lê Hoàng Phong, Nguyễn Bá Chuyên, Vũ Ngọc Thành*
Trường Đại học Lạc Hồng, Số 10, Huỳnh Văn Nghệ, Trần Biên, Đồng Nai, Việt Nam
*Tác giả liên hệ: ngocthanhvu@lhu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 30/07/2026
Ngày hoàn thiện: 07/08/2026
Ngày chấp nhận: 20/08/2026
Ngày đăng: 30/08/2026

TỪ KHÓA

Sợi polypropylene vĩ mô;
Ứng xử chịu cắt;
Dầm bê tông cốt thép không cốt đai;
Hiệu ứng cầu nối vết nứt.

TÓM TẮT

Nghiên cứu trình bày kết quả thực nghiệm nhằm định lượng hiệu quả của sợi Polypropylene (PP) vĩ mô đối với ứng xử chịu cắt và hình thái phá hoại của dầm bê tông cốt thép không bố trí cốt đai. Chương trình thí nghiệm chế tạo bảy mẫu dầm tiết diện 100×150 mm trên nền bê tông M300, với hàm lượng sợi PP gọn sóng biến thiên từ 0% đến 1,5% theo thể tích. Các mẫu được thử uốn bốn điểm với tỷ số nhịp cắt trên chiều cao hữu hiệu cố định $a/d = 2,97$ nhằm ép cấu kiện phá hoại theo mô hình cắt thuần túy. Kết quả cho thấy khi hàm lượng sợi tăng đến 1,5%, sức kháng cắt cực hạn tăng từ 38,85 kN lên 45,75 kN (tăng 17,8%) và độ võng giữa nhịp tăng mạnh tới 34,0%. Nhờ hiệu ứng cầu nối của mạng lưới sợi phân tán cắt ngang vết nứt, cấu kiện chuyển từ phá hoại giòn đột ngột sang phá hoại kém giòn (giả dẻo), phân tán đa điểm. Dựa trên khung lý thuyết Khuntia, nghiên cứu xác định hệ số hiệu quả chịu cắt riêng của sợi PP là $\beta_{PF} = 0,20$ và đề xuất công thức bán thực nghiệm hiệu chỉnh đạt độ chính xác cao với tỷ số thực nghiệm trên dự báo trung bình 0,996 (hệ số biến thiên 0,02). Nghiên cứu bổ sung kịp thời dữ liệu gốc và công cụ tính toán tin cậy cho bê tông cốt sợi tổng hợp, vốn chưa được đề cập đầy đủ trong các tiêu chuẩn hiện hành như TCVN 5574:2018.

SHEAR RESISTANCE ENHANCEMENT OF STIRRUP-FREE ONCRETE BEAMS REINFORCED WITH MACRO POLYPROPYLENE FIBERS

Nguyen Thi Ngoc Bich, Nguyen Thi Anh, Le Hoang Phong, Nguyen Ba Chuyen, Vu Ngoc Thanh*
Lac Hong University, No.10, Huynh Van Nghe Street, Tran Bien Ward, Dong Nai City, Vietnam
*Corresponding Author: ngocthanhvu@lhu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: Jul 30th, 2026
Revised: Aug 7th, 2026
Accepted: Aug 20th, 2026
Published: Aug 30th, 2026

KEYWORDS

Macro-polypropylene fiber;
Shear behavior;
RC beam without stirrups;
Crack bridging effect.

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation quantifying the efficiency of macro-polypropylene (PP) fibers on the shear behavior and failure modes of reinforced concrete beams without stirrups. Seven beam specimens with a 100×150 mm cross-section were cast from an M300 concrete matrix, with crimped macro-PP fiber contents varying from 0% to 1.5% by volume. The specimens were tested under four-point bending with a fixed shear span-to-effective-depth ratio $a/d = 2.97$ to enforce a typical shear failure mechanism. Results show that increasing the fiber content up to 1.5% raised the ultimate shear capacity from 38.85 kN to 45.75 kN (a 17.8% increase) and significantly boosted the mid-span deflection by up to 34.0%. Driven by the bridging effect of the distributed fiber network across the cracks, the behavior transitioned from a sudden brittle shear failure to a less brittle (quasi-ductile), multi-point failure mode. Adopting Khuntia's theoretical framework, a shear efficiency factor specific to macro-PP fibers was calibrated as $\beta_{PF} = 0.20$, yielding a highly accurate proposed semi-empirical formula with a mean experimental-to-predicted ratio of 0.996 (coefficient of variation 0.02). The research provides timely primary data and a reliable calculation tool for synthetic fiber-reinforced concrete, addressing a gap in current design standards such as TCVN 5574:2018.

Available online at: <https://lhj.vn>

1. GIỚI THIỆU

Bê tông cốt thép là vật liệu xây dựng chủ đạo nhưng luôn tiềm ẩn nguy cơ phá hoại giòn đột ngột dưới tác dụng của lực cắt. Khác với phá hoại uốn thường có dấu hiệu báo trước (võng lớn, nứt phát triển từ từ), phá hoại cắt do nứt xiên xảy ra nhanh và ít cảnh báo, nên việc nâng cao độ dẻo và khả năng kiểm soát vết nứt xiên cho dầm luôn là mục tiêu quan trọng trong thiết kế kết cấu an toàn. Việc gia cường bằng sợi Polypropylene (PP) phân tán đang trở thành hướng đi đầy tiềm năng nhờ khả năng cải thiện độ dẻo và cơ chế cầu nối vết nứt, đồng thời có giá thành hợp lý, không bị ăn mòn và dễ thi công so với sợi thép.

Trên thế giới, nhiều công trình nền tảng đã khẳng định hiệu quả của sợi tổng hợp đối với sức kháng cắt của dầm. Altoubat và cộng sự [1] chứng minh sợi tổng hợp dạng lớn có thể thay thế cốt đai tối thiểu trong dầm không cốt đai và làm chuyển dạng phá hoại từ giòn sang dẻo. Carnovale và Vecchio [2] so sánh trực tiếp sợi thép và sợi PP, cho thấy dù mô đun đàn hồi thấp hơn, sợi PP với hàm lượng đủ lớn vẫn cung cấp khả năng kháng cắt tương đương nhờ mật độ sợi dày đặc hơn. Zarrinpour và Chao [3] xây dựng cơ sở dữ liệu lớn và chỉ ra rằng các công thức ACI 318 hiện hành thường đánh giá thấp khả năng chịu cắt của dầm có sợi tổng hợp. Sahoo và cộng sự [4] phân tích hiệu quả cộng hưởng giữa cốt đai và sợi PP trong việc kiểm soát bề rộng vết nứt và độ cứng sau nứt.

Tại Việt Nam, phần lớn các nghiên cứu về sợi PP mới dừng ở cấp độ vật liệu khảo sát ảnh hưởng của sợi đến cường độ nén, kéo uốn, chống mài mòn và co ngót [5], hoặc quan hệ ứng suất – biến dạng nén của bê tông cốt sợi [8]. Các nghiên cứu chuyên sâu về ứng xử chịu cắt của cấu kiện chủ yếu tập trung vào sợi thép [6], trong khi công thức thiết lập cho sợi thép không thể áp dụng nguyên vẹn cho sợi PP do khác biệt về bản chất vật liệu. Như vậy vẫn tồn tại một khoảng trống rõ rệt: thiếu dữ liệu thực nghiệm gốc về ứng xử chịu cắt của dầm chỉ sử dụng riêng sợi PP, và đặc biệt là chưa có công thức tính toán thống nhất, tin cậy để dự báo sức kháng cắt cho loại cấu kiện này. Các tiêu chuẩn hiện hành như TCVN 5574:2018 [9], ACI 318 [11] hay Eurocode 2 [12] đều coi bê tông là vật liệu giòn và chưa kể đến đóng góp của sợi phân tán vào sức kháng cắt.

Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu này thực hiện chương trình thí nghiệm uốn bốn điểm trên bảy nhóm dầm bê tông cốt thép không cốt đai với hàm lượng sợi PP thay đổi từ 0% đến 1,5% theo thể tích, nhằm: (i) định lượng ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến sức kháng cắt cực hạn, độ dẻo và cơ chế phá hoại; và (ii) hiệu chỉnh mô hình lý thuyết Khuntia [7] vốn được thiết lập cho sợi thép để xác định hệ số hiệu quả chịu cắt riêng của sợi PP và đề xuất một công thức bán thực nghiệm dự báo sức kháng cắt cho dầm bê tông cốt sợi PP.

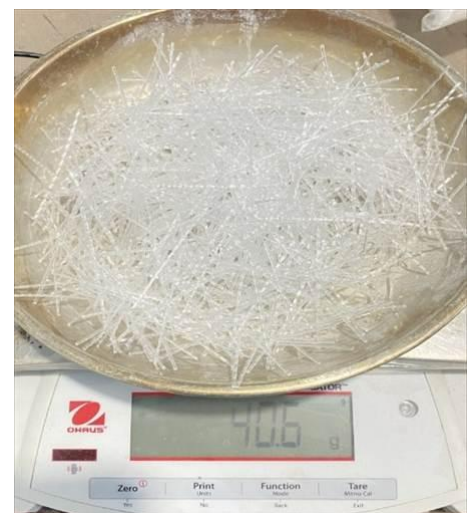
2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1 Vật liệu

Bê tông nền sử dụng cấp độ bền M300 (tương đương B22,5). Xi măng là PCB40 Hà Tiên; cát sông Đồng Nai có mô đun độ lớn 2,6; đá dăm 1×2 khai thác tại mỏ Núi Nhỏ (Hóa An) với $D_{max} = 20$ mm, khối lượng riêng thể tích

2,65 g/cm³; nước trộn là nước sinh hoạt. Cấp phối cho 1 m³ bê tông (thiết kế theo phương pháp thể tích tuyệt đối) gồm xi măng 355 kg, cát 645 kg, đá 1168 kg và nước 195 lít, độ sụt mục tiêu 10±2 cm.

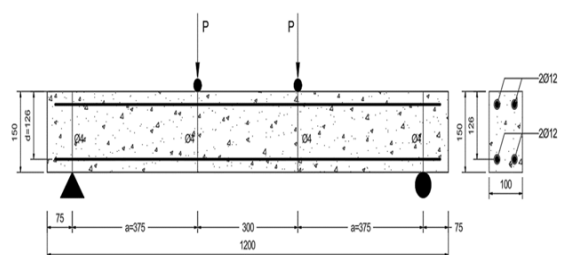
Cốt thép dọc chịu kéo bố trí 4Ø12 thép thanh vân CB400-V nhằm đảm bảo dầm phá hoại hoàn toàn do lực cắt, loại bỏ nguy cơ phá hoại uốn trước khi đạt tải cực hạn. Trong vùng nhịp cắt hoàn toàn không bố trí cốt đai để cô lập và đánh giá trực tiếp đóng góp kháng cắt của riêng bê tông và sợi PP. Sợi gia cường là sợi Polypropylene vĩ mô (macro-synthetic) có bề mặt gợn sóng (crimped) để tăng lực bám dính cơ học, với các thông số: chiều dài $L = 48$ mm, đường kính tương đương $D = 0,8$ mm (tỷ số hình dạng $l_f/d_f = 60$), khối lượng riêng 0,9 g/cm³ và cường độ chịu kéo giới hạn 550 MPa; các chỉ tiêu cơ lý của sợi được tham chiếu theo phương pháp thử TCVN 12392:2018 [10] (Hình 1).



Hình 1. Sợi gia cường Polypropylene vĩ mô dạng gợn sóng

2.2 Cấu tạo mẫu và ma trận thí nghiệm

Chương trình thí nghiệm gồm bảy mẫu dầm tiết diện 100×150 mm, chiều dài 1200 mm, chỉ khác nhau ở hàm lượng sợi PP. Mẫu đối chứng M0 không chứa sợi; sáu mẫu còn lại (M1-0.25PF đến M1-1.5PF) có hàm lượng sợi theo thể tích lần lượt 0,25%; 0,5%; 0,75%; 1,0%; 1,25% và 1,5% (tương ứng 2,25 đến 13,5 kg/m³). Chi tiết cấu tạo cốt thép được thể hiện trên Hình 2.

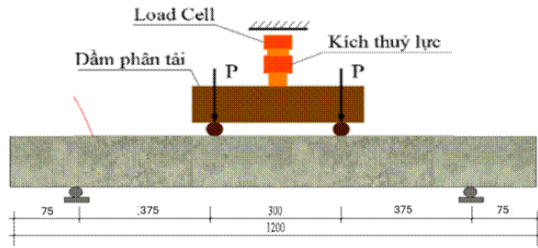


Hình 2. Chi tiết bố trí cốt thép trong mẫu dầm thí nghiệm

2.3 Sơ đồ và quy trình thí nghiệm

Các mẫu được thử uốn bốn điểm với tải trọng tĩnh đơn điệu tăng dần đến khi phá hoại. Khoảng cách hai gối tựa $L_0 = 1050$ mm; hai điểm đặt lực cách đều giữa nhịp 200 mm; nhịp cắt từ gối đến điểm đặt lực gần nhất $a = 375$ mm; chiều

cao hữu hiệu $d = 126$ mm. Tỷ số nhíp cắt trên chiều cao hữu hiệu $a/d = 375/126 = 2,97$ — tỷ lệ hình học điển hình để ép cấu kiện phá hoại theo mô hình cắt thuần túy, tránh phá hoại uốn (Hình 3).



Hình 3. Sơ đồ thiết bị thí nghiệm tải uốn bốn điểm và bố trí thiết bị đo

Tải trọng được truyền từ kích thủy lực qua dầm phân tải thép chữ I và đo bằng cảm biến lực (load cell) 200 kN. Độ võng giữa nhíp được ghi nhận bằng một đầu đo chuyên vị điện từ LVDT độ chính xác 0,01 mm đặt tại tim đáy dầm. Tín hiệu lực và chuyển vị được thu đồng bộ qua bộ thu NI. Tốc độ gia tải khoảng 0,1 kN/s, đồng thời quan sát và đánh dấu diễn biến hình thành, phát triển vết nứt. Mẫu được trộn bằng máy trộn cưỡng bức với quy trình rải sợi có kiểm soát để tránh vón cục, bảo dưỡng ẩm liên tục 7 ngày và thử tải ở tuổi 28 ngày.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1 Cường độ chịu nén của bê tông nền

Kiểm tra trên mẫu lập phương $150 \times 150 \times 150$ mm bảo dưỡng ngâm nước 28 ngày cho cường độ chịu nén lần lượt 34,45; 32,62 và 32,22 MPa, trung bình 33,09 MPa, tương đương cấp độ bền B22,5 (mức tiêu M300) theo TCVN 5574:2018. Độ phân tán giữa các mẫu rất thấp (sai số < 5%), khẳng định quy trình thiết kế cấp phối, trộn cưỡng bức và bảo dưỡng được kiểm soát tốt, qua đó cô lập chính xác đóng góp của sợi PP ở các bước phân tích sau.

3.2 Khả năng chịu tải và biến dạng

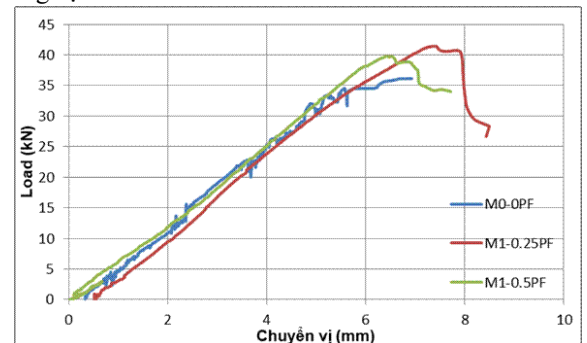
Kết quả tổng hợp lực phá hoại cực hạn P_{max} và độ võng tại đỉnh tải Δ được trình bày ở Bảng 1. Do vùng nhíp cắt không bố trí cốt đai, toàn bộ phần tải trọng gia tăng so với mẫu đối chứng được đóng góp bởi tương tác giữa ma trận bê tông và mạng sợi PP phân tán.

Bảng 1. Lực cực hạn và độ võng của dầm theo hàm lượng sợi PP

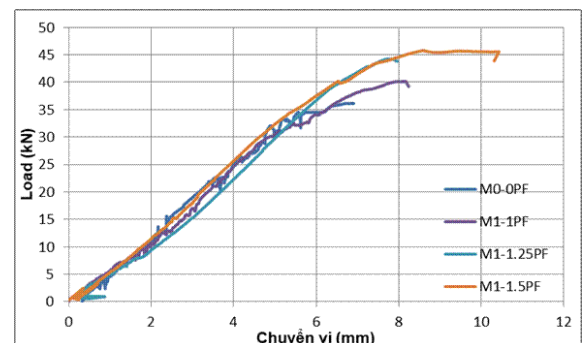
Ký hiệu mẫu	Vf (%)	P_{max} (kN)	Tăng lực (%)	Δ (mm) / tăng (%)
M0 (đối chứng)	0,00	38,85	—	6,42 / —
M1-0.25PF	0,25	39,82	2,5	7,20 / 12,1
M1-0.5PF	0,50	40,16	3,4	7,60 / 18,4

M1-0.75PF	,75	40,92	5,3	7,71 / 20,1
M1-1PF	1,00	41,41	6,6	7,40 / 15,3
M1-1.25PF	,25	44,51	14,6	8,30 / 29,3
M1-1.5PF	,50	45,75	17,8	8,60 / 34,0

Khi hàm lượng sợi tăng từ 0% lên 1,5%, lực phá hoại cực hạn tăng dần từ 38,85 kN lên 45,75 kN (tăng 17,8%). Đáng chú ý hơn là mức cải thiện độ dẻo: độ võng cực hạn giữa nhíp tăng mạnh từ 6,42 mm lên 8,60 mm (tăng tới 34,0%). Điều này chứng tỏ cấu kiện đã chuyển từ trạng thái phá hoại giòn đột ngột sang phá hoại dẻo hoặc giả dẻo — một tiêu chí quan trọng đối với an toàn kết cấu. Có thể nhận thấy hiệu quả của sợi tăng nhanh hơn ở hàm lượng cao (từ 1,25% trở lên), gợi ý khả năng tồn tại một ngưỡng chuyển tiếp về hiệu quả bắc cầu của mạng sợi; tuy nhiên, do mỗi cấp hàm lượng chỉ có một mẫu (không lặp), nhận định này cần được kiểm chứng bằng thí nghiệm có lặp trước khi khẳng định.



Hình 4. Quan hệ lực – chuyển vị nhóm hàm lượng thấp



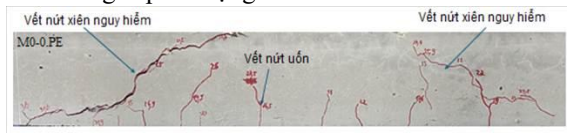
Hình 5. Quan hệ lực – chuyển vị nhóm hàm lượng cao

Quan hệ lực – chuyển vị (Hình 4 và Hình 5) cho thấy trong giai đoạn đàn hồi trước nứt, các đường cong gần như trùng nhau, nghĩa là hàm lượng sợi dưới 1,5% hầu như không làm thay đổi độ cứng ban đầu của dầm. Sau nứt, đường cong của mẫu đối chứng M0 đi xuống dốc đứng ngay khi đạt đỉnh, thể hiện đặc tính giòn hoàn toàn; trong khi các mẫu có sợi (đặc biệt là M1-1.25PF và M1-1.5PF) duy trì một đoạn giảm tải từ từ với diện tích dưới đường

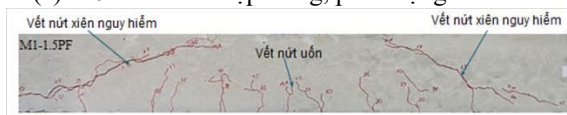
cong (năng lượng hấp thụ) lớn hơn hẳn, khẳng định khả năng chịu tải sau nứt đáng kể của dầm cốt sợi PP.

3.3 Hình thái phá hoại và cơ chế cầu nối vết nứt

Với tỷ số $a/d = 2,97$, mẫu đối chứng M0 xuất hiện một vết nứt xiên chủ đạo có góc nghiêng điển hình kéo dài từ gối tựa lên điểm đặt lực; vết nứt này phát triển rất nhanh, bề rộng lớn và gây phá hoại giòn kiểu cắt - kéo (shear-tension) ngay khi đạt tải cực hạn (Hình 6a). Khi có mặt sợi PP vĩ mô gọn sóng phân tán ngẫu nhiên, hình thái nứt xiên chuyển từ dạng tập trung sang dạng phân tán đa điểm (Hình 6b): mặt nứt xiên bị băm nhỏ thành nhiều nhánh phụ song song hoặc đan xen, bề rộng vết nứt chủ đạo thu hẹp đáng kể dưới cùng cấp tải trọng.



(a) M0 – nứt xiên tập trung, phá hoại giòn



(b) M1-1.5PF – nứt phân tán đa điểm

Hình 6. Hình thái vết nứt của mẫu đối chứng (a) và mẫu 1,5% sợi PP (b)

Cơ chế cốt lõi là hiệu ứng cầu nối: khi bê tông bắt đầu nứt, các sợi PP gọn sóng đóng vai trò những chiếc cầu vòm giữ chặt hai vách vết nứt, cản trở sự mở rộng và lan truyền của vết nứt xiên chủ đạo, ép nội lực phân phối lại sang các vùng bê tông lân cận và kéo dài quá trình phá hủy. Chính cơ chế này giải thích đồng thời cả sự gia tăng sức kháng cắt lẫn sự cải thiện mạnh về độ dẻo và năng lượng hấp thụ của dầm.

3.4 Cơ sở hiệu chỉnh và mô hình tham chiếu Khuntia

Các kết quả thực nghiệm ở trên đã cho thấy sợi PP làm gia tăng rõ rệt sức kháng cắt và độ dẻo của dầm. Để chuyển những quan sát định tính này thành một công cụ tính toán phục vụ thiết kế, phân tiếp theo khai thác trực tiếp bộ số liệu bảy mẫu nhằm hiệu chỉnh một mô hình lý thuyết sẵn có cho phù hợp với sợi PP. Mô hình được lựa chọn làm khung tham chiếu là mô hình Khuntia và cộng sự [7] một trong những mô hình bán thực nghiệm phổ biến và đơn giản nhất để tính sức kháng cắt của dầm bê tông cốt sợi không cốt đai.

Theo Khuntia và cộng sự [7], sức kháng cắt cực hạn của dầm bê tông cốt sợi không cốt đai là tổng đóng góp của bê tông V_c và của sợi V_{fs} :

$$V_u = V_c + V_{fs} \quad (1)$$

Đóng góp của bê tông tính theo biểu thức bán thực nghiệm dạng ACI mà Khuntia sử dụng (với $a/d > 2$, góc nứt nghiêng giả thiết 45°). Đóng góp của sợi được truyền qua ứng suất kéo dư ơp phân bố đều trên vết nứt nghiêng; với chiều cao chịu cắt hữu hiệu $d_v \approx 0,9d$ và góc nứt 45° :

$$\sigma_p = 0,41\beta\tau_b \left(l_f / d_f \right) V_f \quad (2)$$

$$V_{fs} = 0,9bd\sigma_p \quad (3)$$

$$\tau_b = 0,68\sqrt{f_c} \quad (4)$$

trong đó f_c là cường độ chịu nén mẫu trụ (MPa); β là hệ số hình dạng sợi; τ_b là lực bám dính sợi – bê tông; V_f là phần thể tích sợi; l_f , d_f là chiều dài và đường kính sợi; b , d là bề rộng và chiều cao làm việc. Cần lưu ý rằng toàn bộ mô hình này - gồm hệ số 0,41, hệ số hình dạng $\beta = 1$ và luật bám dính $\tau_b = 0,68\sqrt{f_c}$ - được Khuntia thiết lập riêng cho sợi thép móc phá hoại theo cơ chế nhổ sợi (pull-out). Sợi PP có bản chất vật liệu khác hẳn (Bảng 2), nên các tham số này không được phép áp dụng trực tiếp mà phải hiệu chỉnh từ thực nghiệm.

Bảng 2. So sánh đặc trưng của sợi thép (mô hình Khuntia) và sợi PP (nghiên cứu này)

Đặc trưng	Sợi thép (Khuntia)	Sợi PP (nghiên cứu này)
Mô đun đàn hồi	$\approx 210 \text{ GPa}$	$\approx 12 \text{ GPa}$
Cường độ chịu kéo	$\approx 1.345 \text{ MPa}$	550 MPa
Hình dạng / neo bám	Móc hai đầu (hooked-end)	Gọn sóng (crimped)
Cơ chế bám dính	Dính kết + neo cơ học	Ma sát + neo hình học
Phá hoại tại vết nứt	Nhổ sợi (pull-out)	Nhổ hoặc đứt sợi
Tham số trong (2)	$\beta = 1$; $\tau_b = 0,68\sqrt{f_c}$	Cần hiệu chỉnh (β_{PP})

3.5 Quy đổi số liệu và tách đóng góp của sợi

Trong sơ đồ uốn bốn điểm, lực cắt trong nhịp cắt bằng một nửa tải trọng tác dụng, do đó lực cắt cực hạn thực nghiệm $V_{u,exp} = P_{max}/2$. Các thông số đầu vào: $f_c \approx 0,80 \cdot f_{cube} = 0,80 \cdot 33,09 \approx 26,5 \text{ MPa}$ (suy ra $\sqrt{f_c} = 5,145$; $\tau_b = 3,50 \text{ MPa}$); cốt thép 4Ø12 cho $A_s = 452 \text{ mm}^2$, $\rho_s = 3,59\%$; tỷ số hình dạng $l_f/d_f = 60$.

Do vùng nhịp cắt không bố trí cốt đai, mẫu đối chứng M0 cho trực tiếp đóng góp của riêng bê tông: $V_{c,exp} = 38,85/2 = 19,43 \text{ kN}$. Áp dụng biểu thức bê tông của Khuntia thu được $V_{c,tt} = 14,72 \text{ kN}$, tức tỷ số $V_{c,exp}/V_{c,tt} = 1,32$ cho thấy công thức thiên về an toàn, đánh giá thấp khả năng chịu cắt của bê tông khoảng 32%, phù hợp với kết quả kiểm chứng trên nhiều mẫu dầm trong tài liệu. Vì vậy, để cô lập chính xác đóng góp của riêng sợi, nghiên cứu lấy $V_{c,exp}$

của mẫu M0 làm móc tham chiếu cho bê tông và tách đóng góp của sợi theo (Bảng 3).

Bảng 3. Quy đổi lực cắt thực nghiệm và tách đóng góp của sợi PP

Ký hiệu mẫu	V _f (%)	P _{max} (kN)	V _{u,exp} (kN)	V _{fs,exp} (kN)
M0	0,00	38,85	19,43	0,00
M1-0.25PF	0,25	39,82	19,91	0,49
M1-0.5PF	0,50	40,16	20,08	0,66
M1-0.75PF	0,75	40,92	20,46	1,04
M1-1PF	1,00	41,41	20,71	1,28
M1-1.25PF	1,25	44,51	22,26	2,83
M1-1.5PF	1,50	45,75	22,88	3,45

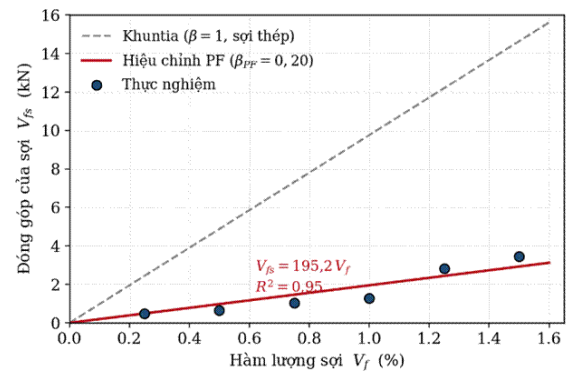
3.6 Xác định hệ số hiệu chỉnh βPF

Nếu áp dụng nguyên vẹn công thức (2)–(3) với β = 1 (sợi thép), đóng góp của sợi bị đánh giá quá cao từ 5 đến 7 lần (ví dụ tại V_f = 0,5%, công thức cho V_{fs} = 4,88 kN trong khi thực nghiệm chỉ 0,66 kN). Nguyên nhân là sợi PP có mô đun đàn hồi thấp và đặc tính bám dính khác hẳn sợi thép móc, nên hiệu quả bắc cầu kém hơn nhiều. Theo (2)–(3), đóng góp của sợi tỷ lệ tuyến tính với hàm lượng: V_{fs} = C_{pf} · V_f. Hồi quy tuyến tính qua gốc tọa độ trên sáu cặp số liệu (V_f, V_{fs,exp}) cho hệ số góc C_{pf} = 195,2 kN với R² = 0,95 (Hình 7). So với hệ số góc của mô hình Khuntia khi β = 1 là 976 kN, suy ra hệ số hiệu chỉnh cho sợi PP:

$$\beta_{PF} = C_{PF} / C_{PFKhuntia} = 195,2 / 976 \approx 0,20 \quad (5)$$

Cần nhấn mạnh rằng βPF = 0,20 không phải là hệ số hình dạng thuần túy như β của Khuntia, mà là một hệ số hiệu quả tổng hợp (lumped) của riêng sợi PP: nó gộp đồng thời ảnh hưởng của mô đun đàn hồi thấp, cường độ chịu kéo nhỏ, cơ chế bám dính ma sát – hình học và kiểu phá hoại thực tế của sợi PP. Nói cách khác, ở cùng hàm lượng và cùng tỷ số hình dạng, sợi PP chỉ huy động được khoảng

20% ứng suất kéo dư mà sợi thép móc tạo ra. Vì được hiệu chuẩn kèm luật tham chiếu $\tau_b = 0,68 \cdot \sqrt{f_c}$, giá trị βPF = 0,20 phải luôn được dùng cùng luật này.



Hình 7. Hiệu chỉnh hệ số đóng góp chịu cắt của sợi PP từ số liệu thực nghiệm

3.7 Công thức đề xuất và kiểm chứng

Thay βPF = 0,20 vào khung Khuntia, lực cắt cực hạn của dầm bê tông cốt thép gia cường sợi PP (không cốt đai) được đề xuất tính theo:

Bảng 4. Kiểm chứng công thức hiệu chỉnh với số liệu thực nghiệm

Ký hiệu	V _f (%)	V _{fs,tt} (kN)	V _{u,exp} (kN)	V _{u,tt} (kN)	exp/ tt
M0	0,00	0,00	19,43	19,43	1,000
M1-0.25PF	0,25	0,49	19,91	19,91	1,000
M1-0.5PF	0,50	0,98	20,08	20,40	0,98
M1-0.75PF	0,75	1,46	20,46	20,89	0,97
M1-1PF	1,00	1,95	20,71	21,38	0,96
M1-1.25PF	1,25	2,44	22,26	21,87	1,01
M1-1.5PF	1,50	2,93	22,88	22,35	1,02

Trung
bình

0,99

Tỷ số trung bình giữa thực nghiệm và dự báo $V_{u,exp}/V_{u,tt} = 0,996$ với độ lệch chuẩn 0,020 và hệ số biến thiên 0,02 cho thấy công thức tái lập tốt số liệu thí nghiệm. Sai số ở từng cấp hàm lượng đều nằm trong khoảng $\pm 3,1\%$, trong đó nhóm hàm lượng thấp (đến 1,0%) có xu hướng bị dự báo hơi cao ($exp/tt < 1$) còn nhóm hàm lượng cao (từ 1,25%) lại bị dự báo hơi thấp ($exp/tt > 1$). Diễn biến này một lần nữa phản ánh nhận định ở mục 3.2 rằng hiệu quả bắc cầu của sợi tăng nhanh hơn ở hàm lượng cao, tức là quan hệ V_f - V_f thực tế có phần phi tuyến nhẹ mà mô hình tuyến tính hiện tại chưa mô tả trọn vẹn; tuy vậy mức sai lệch còn nhỏ nên giả thiết tuyến tính vẫn chấp nhận được trong phạm vi khảo sát.

Một số giới hạn cần lưu ý khi áp dụng công thức đề xuất: (i) $\beta_{PF} = 0,20$ được hiệu chuẩn trên bộ số liệu của riêng nghiên cứu với mỗi cấp hàm lượng chỉ một mẫu (không lặp), cho bê tông M300 và sợi PP gọn sóng L48/D0,8; hơn nữa, do công thức được kiểm chứng lại ngay trên chính bộ số liệu đã dùng để hiệu chuẩn, nên độ chính xác rất cao (tỷ số thực nghiệm/dự báo trung bình $\approx 0,996$; hệ số biến thiên 0,02) chủ yếu phản ánh mức độ khớp số liệu (goodness-of-fit) chứ chưa phải năng lực dự báo trên số liệu độc lập, do đó cần kiểm chứng chéo trên bộ số liệu độc lập và rộng hơn trước khi tổng quát hóa cho các cấp bê tông và loại sợi khác; (ii) mô hình giả thiết quan hệ tuyến tính theo V_f , trong khi số liệu cho thấy hiệu quả sợi tăng nhanh hơn ở hàm lượng cao (trên 1,25%), gợi ý có thể tồn tại một ngưỡng chuyển tiếp cần nghiên cứu thêm; đặc biệt, bước nhảy sức kháng tại 1,25% (lực phá hoại cực hạn từ 41,41 kN lên 44,51 kN) chưa thể tách bạch hoàn toàn khỏi phân tán mẫu khi mỗi cấp chỉ một mẫu, nên cần thí nghiệm có lặp để khẳng định; (iii) do kế thừa mô hình sợi thép phá hoại theo cơ chế nhổ sợi, công thức chỉ phù hợp khi sợi PP cũng chủ yếu bị nhổ thường đúng với bê tông thường; với nền bám dính rất cao (ví dụ geopolymer), sợi có thể bị đứt (rupture) và khi đó β_{PF} phải được xác định lại; (iv) công thức kế thừa giả thiết góc nứt 45° và ứng suất kéo dư phân bố đều của Khuntia, có thể được nâng cấp bằng lý thuyết trường nén hiệu chỉnh (MCFT) để mô tả chính xác hơn ảnh hưởng của biến dạng dọc và hiệu ứng kích thước. Dù còn các giới hạn trên, công thức đề xuất vẫn cung cấp một công cụ đơn giản, có cơ sở vật lý và độ chính xác cao để ước

lượng nhanh sức kháng cắt của dầm bê tông cốt sợi PP không cốt đai — điều mà các tiêu chuẩn hiện hành còn bỏ ngỏ.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện chương trình thí nghiệm uốn bốn điểm trên bảy nhóm dầm bê tông cốt thép không cốt đai với hàm lượng sợi Polypropylene vĩ mô thay đổi từ 0% đến 1,5% theo thể tích. Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng sợi đến 1,5%, sức kháng cắt cực hạn tăng 17,8% (từ 38,85 kN lên 45,75 kN) và độ võng tại đỉnh tải tăng mạnh tới 34,0% (từ 6,42 mm lên 8,60 mm), trong khi độ cứng giai đoạn đàn hồi trước nứt hầu như không đổi; đồng thời, hiệu ứng cầu nổi của mạng sợi PP đã chuyển hình thái nứt xiên từ tập trung sang phân tán đa điểm, giúp dầm chuyển từ phá hoại giòn đột ngột như ở mẫu đối chứng sang phá hoại dẻo hoặc giả dẻo, kéo dài quá trình phá hủy và gia tăng đáng kể năng lượng hấp thụ. Trên cơ sở tách riêng đóng góp của bê tông (qua mẫu đối chứng M0) và của sợi bằng hồi quy tuyến tính ($R^2 = 0,95$), nghiên cứu đã hiệu chỉnh thành công mô hình Khuntia (1999) vốn xây dựng cho sợi thép sang sợi PP với hệ số hiệu chỉnh $\beta_{PF} \approx 0,20$, và công thức đề xuất khi kiểm chứng lại với toàn bộ số liệu cho tỷ số $V_{u,exp}/V_{u,tt}$ trung bình 0,996 (hệ số biến thiên 0,02), khẳng định độ tin cậy cao và bổ khuyết một khía cạnh mà các tiêu chuẩn hiện hành (TCVN 5574:2018 [9], ACI 318 [11], Eurocode 2 [12]) chưa đề cập. Do phạm vi thực nghiệm còn hạn chế (một loại sợi PP với tỷ số hình dạng cố định $l_f/d_f = 60$, mỗi cấp hàm lượng một mẫu), hệ số β_{PF} và công thức hiệu chỉnh cần được kiểm chứng độc lập trên bộ số liệu rộng hơn.

Về số lượng mẫu: Việc thiếu mẫu lặp (mỗi cấp hàm lượng chỉ có 1 mẫu) khiến nghiên cứu chưa thể loại trừ sai số ngẫu nhiên. Do đó, sự nhảy vọt sức kháng cắt tại hàm lượng 1,25% cần được kiểm chứng lại bằng các thí nghiệm có lặp để khẳng định chắc chắn.

Về kích thước cấu kiện: Thí nghiệm mới chỉ giới hạn ở một kích thước dầm cố định (100x150x1200 mm, $a/d = 2,97$). Điều này dẫn đến nghiên cứu chưa đánh giá được sự ảnh hưởng của kích thước - một yếu tố quan trọng làm suy giảm sức kháng cắt ở dầm thực tế lớn hơn.

Hướng phát triển: Các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng khảo sát trên các tỷ số a/d khác nhau và các kích thước dầm lớn hơn đồng thời mở rộng khảo sát ảnh hưởng của cấp bê tông trong các nghiên cứu tiếp theo.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Altoubat, S., Yazdanbakhsh, A., & Rieder, K. A. Shear behavior of macro-synthetic fiber-reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Materials Journal*, **2009**, 106(4): 381-389.
DOI: 10.14359/56659
- [2] David Carnovale and Frank J. Vecchio. Effect of Fiber Material and Loading History on Shear Behavior of Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, **2014**, 111(5): 1235-1244.
DOI: 10.14359/51687030

- [3] Mohammad Reza Zarrinpour and Shih-Ho Chao. Shear Strength Enhancement Mechanisms of Steel Fiber-Reinforced Concrete Slender Beams. *ACI Structural Journal*, **2017**, 114(3): 729-742.
DOI: 10.14359/51689449

- [4] Sahoo, D. R., Bhagat, S., & Reddy, T. C. V. Experimental study on shear-span to effective-depth ratio of steel fiber reinforced concrete T-beams. *Materials and Structures*, **2016**, 49: 3815-3830.
DOI: 10.1617/s11527-015-0756-6

- [5] Nguyễn Thanh Sang. Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi polypropylene đến các tính chất cơ lý của bê tông. Tạp chí Giao thông Vận tải, **2013**, số tháng 11/2013
- [6] Nguyễn Văn Hùng. Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt sợi thép. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (NUCE), **2018**, 12(3): 45–52.
- [7] Khuntia, M., Stojadinovic, B., & Goel, S. C. Shear strength of normal and high-strength fiber reinforced concrete beams without stirrups. ACI Structural Journal, **1999**, 96(2): 282–289.
DOI: 10.14359/620
- [8] Trần Thế Truyền. Nghiên cứu tính năng cơ học của bê tông cốt sợi lai tạo (Hybrid) thép – Polypropylene. Tạp chí Giao thông Vận tải, **2016**, số tháng 06/2016.
- [9] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 5574:2018 – Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam, **2018**.
- [10] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 12392:2018 – Sợi cho bê tông: Phương pháp thử. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam, **2018**.
- [11] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318). American Concrete Institute, **2011**.
- [12] European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1). CEN, Brussels, **2004**.
DOI: 10.58491/2735-4202.3205
- [13] Koura, M. M., Tahwia, A. M., & Matthana, M. H. Influence of macro-synthetic fibers on the flexural behavior of high strength concrete beams reinforced with GFRP bars, **2024**, Mansoura Engineering Journal, 49(4).
DOI: 10.3390/buildings14072123
- [14] Medeiros, A. et al. A Study of the Shear Behavior of Concrete Beams with Synthetic Fibers Reinforced with Glass and Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars, **2024**, MDPI, 14(7), 2123.
DOI: 10.3390/buildings14072123
- [15] Alkhattat, S., & Al-Ramahee, M. Shear performance of reinforced self-compacting concrete beams incorporating steel and polypropylene fibers, **2021**, Scientific Review Engineering and Environmental Sciences, 30(4), 537-551.
DOI: 10.22630/PNIKS.2021.30.4.45