

## Nghiên cứu ứng xử kéo rút của đa sợi thép trong bê tông

**Đặng Văn Phi<sup>1,2\*</sup>, Tăng Văn Lâm<sup>1,2</sup>, Lê Huy Việt<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Trường Đại học Mỏ - Địa chất

<sup>2</sup>Nhóm nghiên cứu mạnh : Địa kỹ thuật, vật liệu và phát triển bền vững (GECS), Trường Đại học Mỏ - Địa chất

### TỪ KHOÁ

Ứng xử kéo rút  
Đa sợi thép  
Bê tông

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ứng xử kéo rút của đa sợi thép trong bê tông thông qua thí nghiệm kéo rút với số lượng sợi lần lượt là 1, 4 và 16. Các mẫu thí nghiệm được chế tạo nhằm làm rõ ảnh hưởng của số lượng sợi đến khả năng bám dính, cơ chế truyền ứng suất và sự hình thành vết nứt trong vùng tiếp xúc giữa sợi và bê tông. Kết quả cho thấy khi số lượng sợi tăng, cường độ bám dính trung bình trên mỗi sợi có xu hướng giảm, chủ yếu do sự phân tán ứng suất tiếp xúc và sự chồng lấn của các vết nứt lân cận. Đặc biệt, mẫu chứa một sợi đơn lẻ cho thấy khả năng kháng kéo rút tối ưu trên mỗi đơn vị sợi, ngược lại các mẫu có nhiều sợi ghi nhận mức suy giảm đáng kể. Tuy nhiên, sự gia tăng số lượng sợi cũng dẫn đến khả năng tiêu tán năng lượng cao hơn nhờ sự tương tác phức tạp giữa các vết nứt. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở thực nghiệm hữu ích cho việc mô tả cơ chế bám dính của các sợi thép trong bê tông và hỗ trợ thiết kế tối ưu vật liệu bê tông cốt sợi trong các kết cấu thực tế.

### KEYWORDS

Pullout behavior  
Multiple steel fibers  
Concrete

### ABSTRACT

This study evaluates the pullout behavior of multiple steel fibers in concrete through pullout tests with fiber quantities of 1, 4, and 16. The specimens were prepared to clarify the influence of fiber number on bond strength, stress transfer mechanisms, and crack development at the fiber-concrete interface. The results indicate that as the number of fibers increases, the average bond strength per fiber tends to decrease, primarily due to the redistribution of interfacial stresses and the overlapping of neighboring cracks. In particular, the single-fiber specimen exhibited the highest pullout resistance per unit fiber, whereas specimens with multiple fibers exhibited a significant reduction. Nevertheless, increasing the number of fibers enhanced the overall energy dissipation capacity, attributed to more complex crack interactions. The findings provide valuable experimental evidence for characterizing the bond mechanism of steel fibers in concrete and support the optimal design of fiber-reinforced concrete for practical structural applications.

### 1. Giới thiệu

Bê tông từ lâu đã được xem là vật liệu xây dựng chủ đạo nhờ khả năng chịu nén tốt, tính bền lâu và chi phí hợp lý; tuy nhiên, đặc tính chịu kéo và khả năng kháng nứt của bê tông còn hạn chế, đặc biệt khi xuất hiện các vi nứt trong cấu trúc của bê tông [1–3]. Sự gia cường bằng sợi thép trong bê tông đã chứng minh hiệu quả rõ rệt trong việc cải thiện độ dẻo, nâng cao cường độ chịu kéo sau nứt, gia tăng khả năng hấp thụ năng lượng và kiểm soát sự lan truyền vết nứt của vật liệu này nhờ vào cơ chế “bắc cầu” của sợi qua các vết nứt [4, 5]. Hiệu quả này phụ thuộc mạnh mẽ vào liên kết giữa sợi và bê tông, trong đó ứng xử kéo rút đóng vai trò quyết định đối với sự tham gia của sợi vào khả năng chịu tải trọng của cấu kiện bê tông [6]. Trong nhiều thập kỷ qua, các nghiên cứu đã tập trung khảo sát cơ chế kéo rút của sợi thép đơn, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của nhiều yếu tố như hình dạng đầu sợi (thẳng, có móc, xoắn, v.v.), chiều dài neo, đường kính sợi, điều kiện bề mặt, v.v., cũng như cường độ và cấu trúc lỗ rỗng của bê tông

[7–9]. Các kết quả này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc dự đoán khả năng chịu lực và độ bền sau nứt của bê tông, đặc biệt trong các loại bê tông có hiệu suất cao như UHPC (Ultra-High Performance Concrete) [6, 10]. Tuy nhiên, trong thực tế thi công, sợi thép hiếm khi tồn tại riêng lẻ mà thường được phân bố với mật độ cao trong hỗn hợp bê tông; khi đó, hiện tượng tương tác giữa các sợi trở thành yếu tố quan trọng, có thể làm giảm hoặc thay đổi đáng kể lực bám dính, đường cong tải trọng-biến dạng, cũng như cơ chế phá hủy so với trường hợp sợi đơn. Một số nghiên cứu gần đây đã mở rộng phạm vi khảo sát sang các thí nghiệm kéo rút đa sợi thép, nhằm làm rõ tác động của số lượng sợi, khoảng cách giữa các sợi, hình dạng đầu sợi, góc đặt sợi, v.v. Kết quả cho thấy, sự xuất hiện của nhiều sợi có thể dẫn đến hiện tượng giảm cường độ liên kết do vùng bê tông xung quanh sợi bị suy yếu hoặc do các mặt nứt giao thoa, đồng thời khả năng trượt của sợi cũng có thể bị giới hạn bởi sự chèn ép lẫn nhau [11–14]. Bên cạnh đó, các thông số của bê tông như cường độ nén, mô đun đàn hồi, kích thước cốt liệu mịn, hàm lượng phụ gia khoáng hoặc tỷ lệ nước-chất kết dính có thể

\*Liên hệ tác giả: dangvanphi@humg.edu.vn

Nhận ngày 30/08/2025, sửa xong ngày 20/10/2025, chấp nhận đăng ngày 21/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2025.1097>

ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử kéo rút của sợi trong điều kiện đa sợi, nhưng vẫn chưa được phân tích toàn diện, đặc biệt trong bối cảnh sử dụng vật liệu địa phương hoặc khi xét đến tuổi bê tông trong giai đoạn đầu [9, 11–14].

Từ những phân tích ở trên có thể thấy rằng, các công trình trước đây đã tập trung làm rõ cơ chế bám dính của sợi thép đơn trong bê tông, đồng thời phân tích ảnh hưởng của hình dạng sợi, chiều dài neo và cường độ bê tông đến ứng xử kéo rút sợi thép. Tuy nhiên, trong điều kiện thực tế, các sợi thép thường phân bố với mật độ cao, dẫn đến hiện tượng tương tác giữa các sợi, làm thay đổi lực bám dính, năng lượng hấp thụ và cơ chế phá hủy của vật liệu. Mặc dù hiệu ứng nhóm sợi đã được ghi nhận, song nguồn gốc của hiện tượng này đối với đặc tính liên kết bề mặt vẫn chưa được hiểu rõ. Do đó, việc xác định các thông số chỉ phối khả năng kéo rút đa sợi và cơ chế hình thành hiệu ứng nhóm sợi là cần thiết nhằm tối ưu hóa hiệu suất của bê tông, đặc biệt là bê tông siêu tính năng (UHPC). Trên cơ sở đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ứng xử kéo rút của đa sợi thép nhúng trong bê tông, dựa trên thực nghiệm nhằm xem xét đồng thời các tham số bao gồm: (i) Tác động của mật độ sợi thép đến giá trị cực đại của tải trọng kéo rút, (ii) Ảnh hưởng của mật độ sợi thép tới năng lượng hấp thụ và phân tán, (iii) Ảnh hưởng của mật độ sợi thép tới khả năng bám dính. Mục tiêu của nghiên cứu là làm sáng tỏ cơ chế tương tác giữa các sợi và bề mặt sợi-bê tông, từ đó cung cấp dữ liệu thực nghiệm tin cậy phục vụ việc phát triển các mô hình phân tích và mô phỏng số nhằm dự đoán lực kéo rút và đường cong lực-dịch chuyển trong điều kiện đa sợi, đồng thời hỗ trợ thiết kế, tối ưu hóa cấu kiện bê tông cốt sợi.

## 2. Vật liệu và Thí nghiệm

Bảng 1 trình bày thành phần cấp phối, tính công tác và cường độ nén của tổ hợp bê tông được sử dụng trong nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, xi măng Portland được sử dụng làm chất kết dính chính, thành phần hóa học của xi măng được thể hiện trong Bảng 2, khối lượng riêng của xi măng là  $3,15 \text{ g/cm}^3$ , được lấy theo tài liệu [16]. Cát silica có đường kính hạt trung bình là  $0,3 \text{ mm}$ , đường kính trung bình của bột silica khoảng  $10 \mu\text{m}$ . Silica fume chứa khoảng  $98 \%$   $\text{SiO}_2$  và có khối lượng riêng  $2,60 \text{ g/cm}^3$ . Phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate ether dạng dung dịch, với thành phần chất rắn hoạt tính chiếm  $30\%$  khối lượng, được dùng để tăng độ chảy và giảm lượng nước trộn trong bê tông. Sợi thép có đường kính  $0,3 \text{ mm}$ , chiều dài  $30 \text{ mm}$ , khối lượng riêng  $7,9 \text{ g/cm}^3$ . Cường độ kéo đứt của sợi thép là  $2447 \text{ MPa}$ , trong khi mô đun đàn hồi là  $200 \text{ GPa}$  [15].

Quá trình chế tạo mẫu được thực hiện theo tài liệu [17]: Xi măng (XM), silica fume (SF), bột silica (SP) và cát (C) được trộn khô trong

khoảng thời gian 10 phút; Sau giai đoạn trộn khô, nước (N) được chia thành 5 phần bằng nhau và được bổ sung lần lượt, mỗi lần cách nhau 2 phút; Tiếp theo, phụ gia siêu dẻo (PGSD) được chia thành 5 phần và thêm vào hỗn hợp, mỗi lần cách nhau 2 phút. Sau khi tháo khuôn, toàn bộ mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ cao  $90 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  trong 3 ngày, sau đó để ở nhiệt độ phòng  $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , và được thí nghiệm sau 28 ngày.

Hình 1 trình bày mẫu thí nghiệm kéo rút sợi, mẫu gồm hai phần riêng biệt. Ở phần thứ nhất, các sợi thép được bố trí với chiều dài neo trong bê tông là  $5 \text{ mm}$  nhằm khảo sát ứng xử kéo rút của sợi. Ở phần thứ hai, chiều dài neo của sợi trong bê tông là  $23 \text{ mm}$ . Trước khi đổ khuôn, các sợi được cố định vào tấm nhựa PVC dày  $2 \text{ mm}$  để đảm bảo sự phân tách rõ ràng giữa hai vùng của mẫu thí nghiệm [18].

Số lượng sợi được chọn là 1, 4 và 16 nhằm mô phỏng các mức độ tương tác sợi khác nhau trong vật liệu (Hình 2). Mẫu có 1 sợi đại diện cho trường hợp không có tương tác giữa các sợi, trong khi các mẫu có 4 và 16 sợi phản ánh các mức mật độ sợi tăng dần, qua đó cho phép đánh giá ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm sợi đến lực bám dính và cơ chế phá hủy của vật liệu.

Thí nghiệm kéo rút sợi đa sợi được tiến hành trên máy kéo có sức chịu tải  $5 \text{ kN}$  (Hình 3). Lực kéo rút được đo bằng cảm biến tải trọng, trong khi độ trượt được ghi nhận bằng cảm biến. Mẫu được cố định bằng kẹp chuyên dụng trong suốt quá trình thí nghiệm (Hình 3). Tốc độ gia tải trong các thí nghiệm kéo rút đa sợi là  $0,0167 \text{ mm/s}$ , với tần suất ghi dữ liệu tương ứng  $5 \text{ Hz}$  [15].

Cường độ liên kết tại bề mặt giữa sợi thép và bê tông được đánh giá thông qua các phương trình (1) và (2) [18]:

$$\tau_{peak} = \frac{P_{peak}}{N_f \pi d_f L_{em}}, \quad (1)$$

$$\tau_{eq} = \frac{2PE}{N_f \pi d_f L_{em}^2}, \quad (2)$$

Trong đó,  $\tau_{peak}$  thể hiện độ bền liên kết được xác định từ tải trọng kéo lớn nhất ( $P_{peak}$ ),  $\tau_{eq}$  biểu thị độ bền liên kết tương đương, được tính từ công thức hiện trong quá trình kéo sợi,  $d_f$  là đường kính sợi,  $L_{em}$  là chiều dài của sợi thép trong bê tông ( $5 \text{ mm}$ ), và  $N_f$  là số lượng sợi trong mẫu thí nghiệm.

## 3. Kết quả và thảo luận

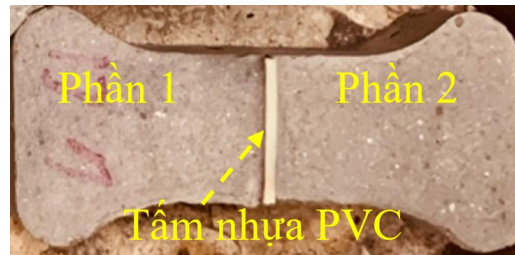
Kết quả thí nghiệm kéo rút sợi thu được đối với ba tổ hợp mẫu TH1S, TH4S và TH16S được trình bày chi tiết trong Bảng 3, đồng thời đường cong biểu diễn mối quan hệ giữa lực kéo và độ dịch chuyển của sợi được trình bày ở Hình 4. Các số liệu thực nghiệm cho thấy cường độ liên kết tại bề mặt tiếp xúc giữa sợi thép và bê tông có sự thay đổi rõ rệt khi thay đổi số lượng sợi thép được bố trí trong các tổ hợp.

**Bảng 1.** Cấp phối vật liệu cho  $1 \text{ m}^3$ , đặc tính công tác và cường độ nén của bê tông.

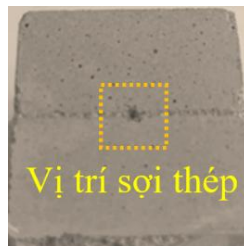
| XM (kg) | C (kg) | SF (kg) | SP (kg) | PGSD (kg) | N (kg) | Độ chảy (mm) | Cường độ nén (MPa) |
|---------|--------|---------|---------|-----------|--------|--------------|--------------------|
| 926     | 1019   | 232     | 278     | 65        | 194    | 220          | 188,27             |

**Bảng 2.** Thành phần hóa học của xi măng [16].

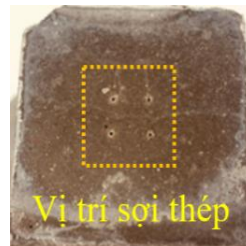
| SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | CaO (%) | MgO (%) | SO <sub>3</sub> (%) | Na <sub>2</sub> O (%) | K <sub>2</sub> O (%) | Hao hụt (%) |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------|
| 21,00                | 4,90                               | 3,30                               | 62,10   | 2,90    | 2,40                | 0,10                  | 1,30                 | 2,00        |



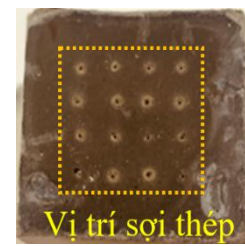
**Hình 1.** Mẫu thí nghiệm kéo rút sợi.



a) TH1S

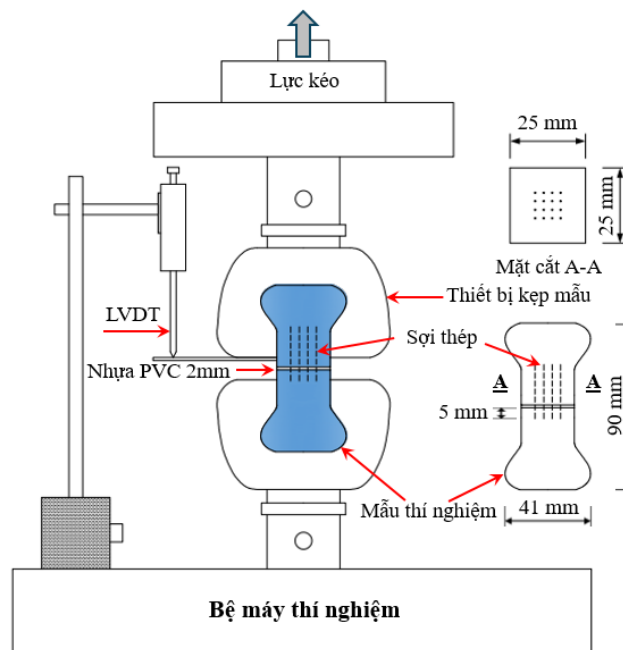


b) TH4S



c) TH16S

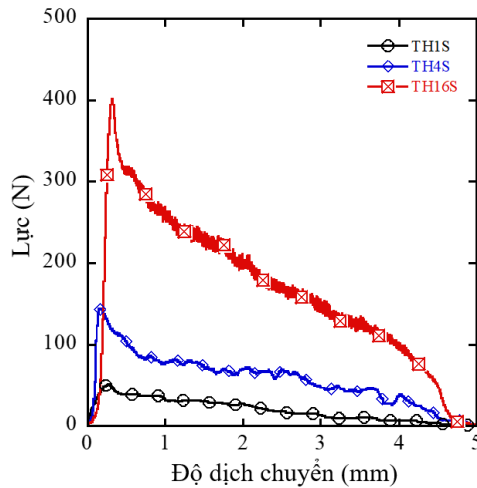
**Hình 2.** Bề mặt mẫu sau thí nghiệm kéo rút sợi.



**Hình 3.** Thí nghiệm kéo sợi.

**Bảng 3.** Các thông số cơ học của các sợi thép dưới tác dụng của lực kéo rút sợi.

| Tổ hợp | $P_{peak}$ (N) | $\tau_{peak}$ (MPa) | $PE$ (N.mm) | $\tau_{eq}$ (MPa) |
|--------|----------------|---------------------|-------------|-------------------|
| TH1S   | 51,02          | 10,83               | 100,15      | 8,51              |
| TH4S   | 144,48         | 7,67                | 286,49      | 6,08              |
| TH16S  | 402,12         | 5,33                | 812,87      | 4,31              |



Hình 4. Lực-độ dịch chuyển của sợi thép trong bê tông.

### 3.1. Ảnh hưởng của số lượng sợi thép đến tải trọng kéo rút cực đại

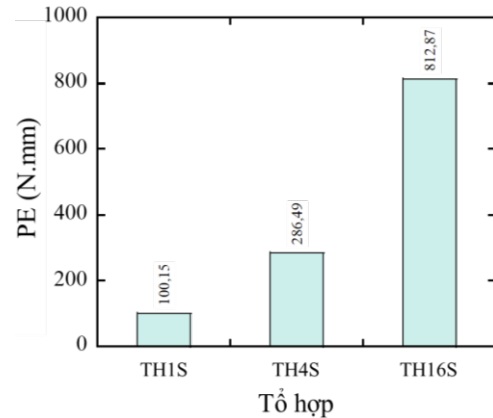
Tải trọng cực đại  $P_{peak}$  trong thí nghiệm kéo rút tăng rõ rệt khi số lượng sợi thép trong mẫu được nâng từ 1 lên 16 sợi (Hình 4). Cụ thể,  $P_{peak}$  đạt 51,02 N đối với mẫu TH1S, 144,48 N đối với mẫu TH4S và 402,12 N đối với mẫu TH16S (Bảng 3). Sự gia tăng này phản ánh vai trò quan trọng của hàm lượng sợi trong việc cải thiện khả năng chịu lực tổng thể của hệ thống liên kết sợi-bê tông. Khi mật độ sợi tăng, ứng suất truyền qua bề mặt tiếp xúc được phân bố đồng đều hơn trong khối bê tông, đồng thời hiệu ứng cầu nổi của sợi giúp kìm hãm sự phát triển của vi khe nứt và duy trì khả năng chịu kéo của vật liệu [14, 19].

Xét ở mức độ vi mô, sự gia tăng tải trọng kéo rút có thể được lý giải thông qua các cơ chế tương tác phức hợp giữa sợi thép và bê tông xung quanh sợi. Trước hết, lực dính bám hóa học hình thành trong giai đoạn đầu khi hồ xi măng bao quanh bề mặt sợi, tạo nên liên kết tĩnh giữa hai pha vật liệu. Tiếp đó, khi tải trọng tăng, liên kết hóa học này bị phá vỡ, nhưng ma sát bề mặt sợi và các hạt xi măng-cốt liệu tiếp tục đóng vai trò chủ đạo trong việc chống trượt [20].

### 3.2. Ảnh hưởng của số lượng sợi thép đến năng lượng tiêu tán

Diện tích nằm dưới đường cong lực-độ dịch chuyển trong thí nghiệm kéo rút sợi (Hình 4) biểu thị công thực hiện trong toàn bộ quá trình kéo rút sợi, ký hiệu là PE, phản ánh trực tiếp khả năng tiêu tán năng lượng và mức độ dẻo của liên kết giữa sợi-bê tông. Kết quả ở Hình 5 cho thấy giá trị PE tăng đáng kể khi số lượng sợi thép trong mẫu tăng từ 1 lên 16 sợi lần lượt là 100,15 Nmm (TH1S), 286,49 Nmm (TH4S) và 812,87 Nmm (TH16S). Sự gia tăng này chứng tỏ rằng mật độ sợi cao đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao khả năng hấp thụ năng lượng và cải thiện ứng xử dẻo của vật liệu bê tông. Ở cấp độ vi mô, mức tăng PE có thể lý giải thông qua sự phối hợp của ba cơ chế chính: (i) Ma sát bề mặt giữa sợi thép và nền xi măng giúp duy trì lực cản trong suốt quá trình trượt; (ii) Khóa cơ học do hình dạng gân hoặc nhám của sợi kết hợp với hồ xi măng-cốt liệu, làm tăng cường độ chống

trượt; (iii) Tương tác nhóm sợi khi mật độ sợi cao, trong đó các sợi lân cận hỗ trợ lẫn nhau, hạn chế sự lan rộng của khe nứt, đồng thời phân tán ứng suất hiệu quả hơn trong bê tông [21]. Sự phối hợp của các cơ chế này khiến năng lượng cần thiết để phá hủy liên kết sợi-bê tông gia tăng, đồng thời làm chậm quá trình mở rộng vết nứt.



Hình 5. Năng lượng tiêu tán của các tổ hợp.

Kết quả này phù hợp với nhận định của tác giả Wang và cộng sự [22], tác giả báo cáo rằng bê tông cường độ cao cốt sợi thép với hàm lượng sợi lớn thể hiện khả năng kháng nứt và tiêu tán năng lượng vượt trội so với mẫu có hàm lượng thấp. Đáng chú ý, vùng sau vị trí lực kéo lớn nhất trên đường cong lực-độ dịch chuyển của mẫu TH16S kéo dài và lớn hơn so với TH1S, minh chứng rằng quá trình trượt của sợi trong bê tông diễn ra chậm dần, thay vì đột ngột, qua đó giúp vật liệu vẫn duy trì được khả năng chịu lực ngay cả khi các vết nứt chính đã hình thành.

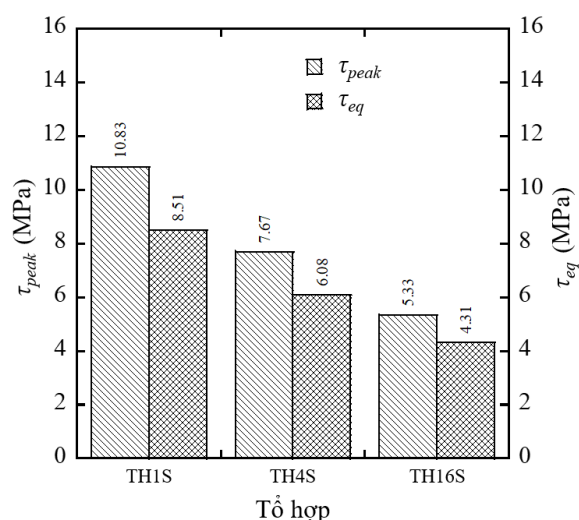
Tuy nhiên, cần lưu ý rằng việc gia tăng năng lượng tiêu tán không đồng nghĩa với việc gia tăng vô hạn hàm lượng sợi. Sau một ngưỡng tối ưu, mật độ sợi quá cao có thể dẫn tới sự phân bố không đồng đều, hình thành lỗ rỗng hoặc tập trung ứng suất cục bộ, làm giảm hiệu quả liên kết sợi-bê tông [23]. Do đó, lựa chọn tỷ lệ sợi hợp lý là điều kiện then chốt để tối ưu hóa khả năng tiêu tán năng lượng và độ bền của bê tông cốt sợi.

### 3.3. Ảnh hưởng của số lượng sợi thép đến cường độ bám dính

Kết quả thí nghiệm cho thấy, trái ngược với xu hướng gia tăng của tải trọng cực đại  $P_{peak}$  và năng lượng tiêu tán PE, các giá trị ứng suất bám dính cực đại  $\tau_{peak}$  và bám dính tương đương  $\tau_{eq}$  lại có xu hướng giảm khi số lượng sợi trong mẫu tăng (Hình 6). Cụ thể  $\tau_{peak}$  giảm từ 10,83 MPa (TH1S) xuống 7,67 MPa (TH4S) và 5,33 MPa (TH16S); trong khi  $\tau_{eq}$  cũng giảm từ 8,51 MPa (TH1S) xuống 4,31 MPa (TH16S). Kết quả này cho thấy khi mật độ sợi thép tăng, ứng suất bám dính trung bình của mỗi sợi đơn giảm, mặc dù khả năng chịu tải trọng tổng thể tăng.

Hiện tượng trên có thể được giải thích thông qua hai cơ chế chính ở cấp vi mô. Thứ nhất là hiệu ứng che chắn: khi các sợi nằm gần nhau trong cùng thể tích bê tông, chúng cản trở sự xâm nhập và bao bọc đầy đủ của hồ xi măng xung quanh từng sợi. Điều này dẫn đến sự

suy giảm chất lượng vùng chuyển tiếp giữa sợi và bê tông, làm giảm độ bền liên kết hóa học và ma sát tại bề mặt tiếp xúc [14]. Thứ hai là tương tác giữa các sợi trong quá trình kéo rút. Khi mật độ sợi cao, diện tích bề mặt hiệu quả để truyền ứng suất từ bê tông sang từng sợi giảm xuống, khiến cơ chế bám dính cơ học trở nên kém hiệu quả hơn [13]. Tuy vậy, các nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng mặc dù mật độ lực bám dính của từng sợi có xu hướng giảm khi hàm lượng sợi tăng, hiện tượng “bó sợi” có thể giúp kết cấu duy trì, thậm chí cải thiện khả năng chịu tải trọng tổng thể. Nhờ đó, bê tông cốt sợi vẫn đạt được giá trị tải trọng và năng lượng tiêu tán cao, ngay cả khi ứng suất bám dính trung bình trên mỗi sợi bị giảm [24].



Hình 6. Cường độ bám dính của các tổ hợp.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đánh giá và phân tích tác động của số lượng sợi thép đến đặc trưng kéo rút của sợi trong bê tông. Các kết luận được rút ra như sau:

- Kết quả thí nghiệm kéo rút cho thấy tải trọng cực đại  $P_{peak}$  và năng lượng tiêu tán  $PE$  tăng đáng kể khi số lượng sợi thép trong mẫu tăng từ 1 lên 16 sợi. Sự gia tăng này phản ánh vai trò của hàm lượng sợi trong việc nâng cao khả năng chịu tải và cải thiện tính dẻo của liên kết sợi-bê tông thông qua cơ chế ma sát, khóa cơ học và hiệu ứng bắc cầu vết nứt.
- Ứng suất bám dính cực đại  $\tau_{peak}$  và bám dính tương đương  $\tau_{eq}$  giảm khi mật độ sợi tăng, do hiệu ứng che chắn và suy giảm chất lượng vùng chuyển tiếp ITZ, đồng thời diện tích bề mặt truyền ứng suất cho từng sợi bị hạn chế. Tuy vậy, “hiệu ứng bó sợi” giúp duy trì tải trọng tổng thể và năng lượng tiêu tán trong bê tông cốt sợi.

Các nghiên cứu tiếp theo nên xem xét toàn diện hơn ảnh hưởng của số lượng sợi, cũng như các yếu tố hình học như hình dạng, đường kính và độ nhám bề mặt, v.v., nhằm tối ưu hóa lực bám dính và cơ chế kéo rút của sợi thép trong điều kiện thực tế.

#### Tài liệu tham khảo

- N.T.T. Hà, N.H. Chi, Sử dụng bê tông cốt sợi thép trong xây dựng mặt đường có nhiều xe tải trọng nặng trên địa bàn tỉnh Hà Nam, Tạp chí Giao thông vận tải, (2023) 68–70.
- T.B. Việt, T.T. Kiên, L.T. Hùng, Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tính chất của bê tông siêu tính năng-UHPC, (2022) 58–62.
- N.Q. Tuấn, P.D. Hòa, N.B. Hà, L.B. Danh, K.Đ. Tùng, Nghiên cứu đánh giá sức kháng uốn của bê tông chất lượng siêu cao: thực nghiệm và mô hình số, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng - ĐHXDHN 16 (2022) 1–13. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(2v\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2v)-01).
- N.T. Thường, H.V. Hải, Nghiên cứu khả năng kháng uốn của bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép dưới tác dụng của tải trọng động, Khoa học & công nghệ Việt Nam, (2021) 40–45.
- N.T. Tran, T.K. Tran, D.J. Kim, High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension, Cem. Concr. Res. 69 (2015) 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.12.008>.
- D.J. Kim, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Correlation between single fiber pullout behavior and tensile response of FRC composites with high strength steel fiber, Fifth Int. Symp. High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos. (2007) 67–76.
- D.J. Kim, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers, ACI Mater. J. 105 (2008) 576–584. <https://doi.org/10.14359/20199>.
- J.K. Park, S.H. Park, D.J. Kim, Effect of matrix shrinkage on rate sensitivity of the pullout response of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete, Cem. Concr. Compos. 94 (2018) 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.014>.
- J.K. Park, T.T. Ngo, D.J. Kim, Interfacial bond characteristics of steel fibers embedded in cementitious composites at high rates, Cem. Concr. Res. 123 (2019) 105802. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105802>.
- K. Wille, D.J. Kim, A.E. Naaman, Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents, Mater. Struct. 44 (2011) 583–598. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9650-4>.
- X. Ding, M. Zhao, H. Li, Y. Zhang, Y. Liu, S. Zhao, Bond Behaviors of Steel Fiber in Mortar Affected by Inclination Angle and Fiber Spacing, Materials (Basel). 15 (2022) 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma15176024>.
- H. Feng, M.N. Sheikh, M.N.S. Hadi, L. Feng, D. Gao, J. Zhao, Pullout Behaviour of Different Types of Steel Fibres Embedded in Magnesium Phosphate Cementitious Matrix, Int. J. Concr. Struct. Mater. 13 (2019) 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0344-1>.
- J.J. Kim, D.Y. Yoo, Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete, Cem. Concr. Compos. 103 (2019) 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006>.
- D.Y. Yoo, J.J. Kim, J.J. Park, Effect of fiber spacing on dynamic pullout behavior of multiple straight steel fibers in ultra-high-performance concrete, Constr. Build. Mater. 210 (2019) 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.171>.
- V.P. Dang, D.J. Kim, Rate-sensitive pullout resistance of smooth-steel fibers embedded in ultra-high performance concrete containing nanoparticles, Cem. Concr. Compos. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105109>.
- D.J. Kim, G.J. Park, H.V. Le, D. Moon, Fresh and hardened properties of steel fiber-reinforced grouts containing ground granulated blast-furnace slag, Constr. Build. Mater. 122 (2016) 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.005>.

- [17]. V.P. Dang, H.V. Le, D.J. Kim, Loading rate effects on the properties of fiber-matrix zone surrounding steel fibers and cement based matrix, *Constr. Build. Mater.* 283 (2021) 122694. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122694>.
- [18]. H.S. Jo, J.K. Park, N.T. Tran, D.J. Kim, Loading rate effects on multifiber pullout resistance of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete, (2024). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03719> Available.
- [19]. C.K.Y. Leung, V.C. Li, Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites, *J. Mech. Phys. Solids* 40 (1992) 1333–1362. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(92\)90018-W](https://doi.org/10.1016/0022-5096(92)90018-W).
- [20]. P. Guerrero, A.E. Naaman, P. Energy, Effect of mortar fineness and adhesive agents on pullout response of steel fibers, *ACI Struct. J.* 97 (2000) 12–20.
- [21]. N. Wiemer, A. Wetzel, M. Schleiting, P. Krooß, M. Vollmer, T. Niendorf, S. Böhm, B. Middendorf, Effect of fibre material and fibre roughness on the pullout behaviour of metallic micro fibres embedded in UHPC, *Materials* (Basel). 13 (2020) 1–21. <https://doi.org/10.3390/ma13143128>.
- [22]. C. Wang, G. Xue, X. Zhao, Influence of fiber shape and volume content on the performance of reactive powder concrete (Rpc), *Buildings* 11 (2021) 1–19. <https://doi.org/10.3390/buildings11070286>.
- [23]. Z. Wu, C. Shi, W. He, L. Wu, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 103 (2016) 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>.
- [24]. H. Zhang, F. Hu, Y. Duan, J. Yang, Z. Duan, L. Cao, Interaction Mechanism of Cementitious Composites Containing Different Twisted PVA Fiber Bundles, *Buildings* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13092194>.