Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (4V): 100–112

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG SỢI THÉP ĐẾN ỨNG XỬ KHI KÉO DỌC TRỤC CỦA BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO

Nguyễn Văn Quang[a], Phạm Thanh Tùng[a], Nguyễn Trung Hiếu[a,*]

[a]*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

*Nhận ngày 28/7/2026, Sửa xong 22/9/2026, Chấp nhận đăng 22/9/2026*

**Tóm tắt**

Bê tông chất lượng siêu cao cốt sợi thép (UHPFRC) là loại vật liệu có nhiều đặc tính vượt trội về cường độ, độ bền chống mài mòn, khả năng chống thấm và độ bền trong môi trường xâm thực. Bên cạnh chất lượng bê tông nền và khả năng bám dính giữa sợi và bê tông nền thì hàm lượng sợi thép là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng tới ứng xử chịu kéo dọc trục của UHPFRC, đặc biệt là khả năng làm việc sau khi xuất hiện vết nứt. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả chế tạo 06 cấp phối UHPFRC với hàm lượng sợi thép thay đổi từ 0% đến 2,5% theo thể tích nhằm đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến các đặc trưng cơ học, bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo dọc trục. Kết quả thí nghiệm cho thấy hàm lượng sợi thép ảnh hưởng tương đối nhỏ đến cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi, nhưng làm tăng rõ rệt cường độ chịu kéo dọc trục và khả năng làm việc sau nứt. Cường độ chịu kéo trung bình tăng từ 6,13 MPa ở mẫu không có sợi lên 9,90 MPa ở mẫu có hàm lượng sợi thép 2,5%, tương ứng mức tăng khoảng 61,5%, đồng thời sự làm việc sau nứt và năng lượng phá hoại khi kéo được cải thiện đáng kể khi hàm lượng sợi thép lớn hơn 1%.

*Từ khoá*: bê tông chất lượng siêu cao cốt sợi thép; UHPFRC; hàm lượng sợi thép; ứng xử kéo dọc trục; ứng xử sau nứt.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF STEEL FIBER CONTENT ON THE DIRECT TENSILE BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE

**Abstract**

Steel fiber-reinforced ultra-high-performance concrete (UHPFRC) is a material with superior properties in terms of strength, abrasion resistance, impermeability, and durability in aggressive environments. Among the governing parameters, such as the binder matrix characteristics, fiber geometry and distribution, and steel fiber–matrix interfacial bond, steel fiber content is one of the key factors affecting the tensile behavior of UHPFRC, particularly its post-cracking performance. In this study, six UHPFRC mixtures with steel fiber volume fractions ranging from 0% to 2,5% were prepared to evaluate the effect of fiber content on the main mechanical properties, including compressive strength, elastic modulus, and direct tensile strength. The experimental results indicate that steel fiber content has an insignificant influence on compressive strength and elastic modulus, but significantly enhances the axial tensile strength and post-cracking behavior of UHPFRC. The average tensile strength increased from 6,13 MPa for the specimen without fibers to 9,90 MPa for the specimen with 2,5% steel fiber content, corresponding to an increase of approximately 61,5%. This improvement is mainly attributed to the fiber-bridging mechanism across the crack surface, in which steel fibers continue to transfer stress through bond, friction, and fiber pull-out.

*Keywords*: steel fiber-reinforced ultra-high-performance concrete; UHPFRC; steel fiber content; direct tension; tensile strength; post-cracking behavior.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(4V)-08 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Bê tông chất lượng siêu cao cốt sợi (UHPFRC) là một trong những bước tiến mới nhất trong công nghệ bê tông [1]. So với bê tông thường (NSC), UHPFRC cho thấy các tính chất cơ học vượt trội, độ bền cao và khả năng làm việc sau khi nứt do sự tham gia làm việc của cốt sợi [2]. Hiện nay, các

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* hieunt@huce.edu.vn (Hiếu, N. T.)

tiêu chuẩn có các định nghĩa khác nhau về UHPFRC, theo tiêu chuẩn Hoa Kỳ ASTM C1856/C1856M UHPFRC được xem là có cường độ chịu nén ≥ 120 MPa và cường độ chịu kéo sau nứt ≥ 5 MPa [3]. Các loại cốt sợi thường được sử dụng trong UHPFRC như sợi thép, sợi thủy tinh, sợi polyme tổng hợp trong đó sợi thép là một trong những loại sợi được sử dụng phổ biến nhất trong loại bê tông này.

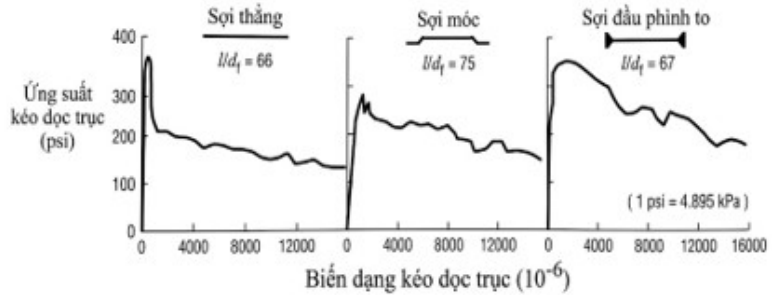
Ngoài cường độ chịu nén thì cường độ chịu kéo và sự làm việc sau nứt của UHPFRC là một chỉ tiêu cơ học quan trọng khi đánh giá tính chất của loại bê tông này. Đối với thí nghiệm kéo dọc trục, nghiên cứu của Hung C.C và cs. [4] tổng hợp cho thấy UHPFRC khi chịu kéo trước khi xuất hiện vết nứt, quan hệ ứng suất biến dạng gần như tuyến tính. Trong khi ứng xử sau khi nứt ảnh hưởng mạnh bởi ba yếu tố chính là: (i) chất lượng bê tông nền, (ii) bám dính giữa cốt sợi và bê tông nền, (iii) hàm lượng sợi thép. Từ ba thông số này, mở ra khá nhiều các hướng nghiên cứu về ứng xử khi kéo. Các nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia khoáng, hàm lượng silica fume, các nghiên cứu việc sử dụng cốt liệu lớn đến ứng xử khi kéo của UHPFRC [4–6] cho các kết quả về tiềm năng sử dụng cốt liệu lớn để giảm giá thành loại bê tông này. Các nghiên cứu với các hình ảnh chụp vi mô đi sâu vào sự bám dính vi mô giữa sợi và bê tông nền [7, 8] cho thấy rõ ảnh hưởng của loại sợi và tỷ lệ chiều dài và đường kính đến bám dính. Các nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng, chiều dài sợi thép như các nghiên cứu [9, 10] về ảnh hưởng của hình dạng sợi như sợi thẳng, sợi móc đầu, sợi xoắn đến ứng xử kéo của UHPFRC. Nghiên cứu này nhận thấy sợi thẳng có vai trò nổi bật ở giai đoạn trước nứt, tuy nhiên sợi móc đầu và sợi xoắn cho lực bám dính tốt khi vết nứt mở rộng. Các nghiên cứu [11–13] về kích thước hình học và đặc trưng bởi tỷ lệ $\lambda$ (chiều dài sợi và đường kính sợi) cho thấy khi $\lambda \leq 65$ ($\approx 13/0{,}2$) là dạng sợi vi mô (microfiber) có kết quả kiểm soát vi nứt (micro-crack), cải thiện độ bền ban đầu trong khi dạng sợi vĩ mô (macrofiber) $\lambda > 65$ cho hiệu quả về chịu lực sau nứt và hiệu ứng bắc cầu giữa các vết nứt (bridging). Các nghiên cứu [14–16] sử dụng lai giữa sợi vi mô và sợi vĩ mô cho thấy sợi vi mô kiểm soát vi nứt, sợi vĩ mô tăng khả năng chịu kéo sau nứt và độ dẻo của UHPFRC. Ở giai đoạn đầu khi chịu kéo, trong nền xi măng bắt đầu xuất hiện vi nứt (microcracks) phân bố khắp vật liệu. Lúc này, sợi vi mô (ngắn, mảnh, mật độ cao) đóng vai trò chính: chúng bắc cầu qua các vi nứt nhỏ, hạn chế sự mở rộng và lan truyền của chúng. Nhờ đó, vật liệu vẫn giữ được tính liên tục, ứng suất tiếp tục tăng - đây là lý do vi mô giúp tăng cường độ kéo và trì hoãn hình thành vết nứt lớn. Khi tải tăng thêm, các vi nứt dần liên kết lại và phát triển thành vết nứt lớn hơn (macrocrack). Tại thời điểm này, vai trò của sợi vi mô giảm dần vì chiều dài neo không đủ để giữ vết nứt lớn. Thay vào đó, sợi vĩ mô (dài hơn) bắt đầu chi phối: chúng bắc cầu qua các vết nứt, chịu kéo và truyền lực qua khe nứt, giúp vật liệu không bị phá hoại giòn ngay lập tức. Hình 1 và Hình 2 trình bày một số loại sợi thép trong UHPFRC và ảnh hưởng tỷ lệ hình dạng đến ứng xử khi kéo của UHPFRC.



(a) Sợi thẳng (b) Sợi móc đầu (c) Sợi xoắn

Hình 1. Các loại sợi thép phổ biến trong UHPFRC

Do ứng xử kéo của UHPFRC phụ thuộc đáng kể vào loại sợi, hàm lượng sợi và đặc tính của bê tông nền, nhiều nghiên cứu khuyến cáo cần thực hiện thí nghiệm kéo trước khi sử dụng các đặc trưng




Hình 2. Ảnh hưởng của loại sợi đến ứng xử kéo dọc trục của UHPFRC [17]

chịu kéo trong tính toán thiết kế như một yêu cầu bắt buộc như cường độ chịu nén.

Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu tập trung làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi thép đến ứng xử cơ học đặc biệt là cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông UHPFRC và cố định các thông số như bê tông nền, loại cốt sợi thép - bám dính (local bond) giữa thép và bê tông nền. Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện trên 6 cấp phối với hàm lượng sợi thép lần lượt từ 0%; 0,5%; 1%; 1,5%; 2% và 2,5% với các chỉ tiêu cơ học là cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo dọc trục.

## 2. Chương trình thí nghiệm

### *2.1. Cấp phối*

Bê tông UHPFRC sử dụng trong nghiên cứu được lựa chọn có cấp độ bền B120, cốt liệu là cát thạch anh có đường kính cỡ hạt trung bình khoảng 300 µm, silica fume (SF), tro bay (FA), xi măng Pooc lăng PC 40, và phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate (PGSD). Sợi thép được sử dụng là sợi thép thẳng có chiều dài $L_f$ là 13 mm, đường kính $d_f$ là 0,2 mm, tỷ số chiều dài/đường kính ($L_f/d_f$ = 65). Cường độ chịu kéo của sợi thép là 2500 MPa. Trong nghiên cứu này, sử dụng các hàm lượng sợi theo thể tích lần lượt là 0%; 0,5%; 1%, 1,5%; 2% và 2,5% nhằm đánh giá ảnh hưởng hàm lượng sợi đến các chỉ tiêu cơ học chính của UHPFRC. Lý do tác giả lựa chọn nghiên cứu tới 2,5% vì các nghiên cứu [5, 6] chỉ ra rằng hàm lượng sợi lớn hơn 2,5% ngoài việc khó kiểm soát được sự phân tán đồng đều của sợi, dễ xảy ra hiện tượng vón sợi (fiber balling) làm giảm đáng kể tính công tác (độ chảy loang) của loại bê tông này gây khó khăn trong các công tác đổ tại chỗ, đồng thời làm tăng đáng kể giá thành của UHPFRC. Chi tiết cấp phối chế tạo và đặc trưng hình học của sợi thép trong nghiên cứu được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông UHPFRC (đơn vị kg/m$^3$)

| $V_f$ (%) | Cát (kg) | Xi măng (kg) | FA (kg) | SF (kg) | PGSD (kg) | Nước (kg) | Sợi thép (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 1108,0 | 831,0 | 166,0 | 111,0 | 36,90 | 164,0 | 0,00 |
| 0,5 | 1102,46 | 826,85 | 165,17 | 110,45 | 36,72 | 163,18 | 39,25 |
| 1,0 | 1096,92 | 822,69 | 164,34 | 109,89 | 36,53 | 162,36 | 78,50 |
| 1,5 | 1091,38 | 818,54 | 163,51 | 109,34 | 36,35 | 161,54 | 117,75 |
| 2,0 | 1085,84 | 814,38 | 162,68 | 108,78 | 36,16 | 160,72 | 157,00 |
| 2,5 | 1080,30 | 810,23 | 161,85 | 108,23 | 35,98 | 159,90 | 196,25 |

Bảng 2. Đặc trưng hình học của sợi thép trong UHPFRC

| Đặc trưng hình học | Sợi thép | Hình ảnh |
|---|---|---|
| Hình dạng | Thẳng |  |
| Chiều dài sợi ($L_f$) | 13 mm | |
| Đường kính ($D_f$) | 0,2 mm | |
| Tỷ lệ ($L_f/D_f$) | 65 | |
| Cường độ chịu kéo | 2500 MPa | |

### 2.2. *Mẫu thí nghiệm và sơ đồ bố trí dụng cụ đo*

Trong nghiên cứu này, chế tạo các mẫu thí nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến các chỉ tiêu cơ học chính của UHPFRC bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo trực tiếp. Bảng 3 trình bày tổng hợp mẫu thí nghiệm trong các nghiên cứu xác định chỉ tiêu cơ học của UHPFRC.

Bảng 3. Bảng tổng hợp mẫu thí nghiệm xác định chỉ tiêu cơ học của UHPFRC

| Thí nghiệm xác định | Kích thước mẫu (mm) | Tiêu chuẩn | Tổng số mẫu |
|---|---|---|---|
| Cường độ chịu nén | $\varnothing 100 \times 200$ | ASTM C39/C39M [18] | 18 |
| Mô đun đàn hồi | $\varnothing 100 \times 200$ | ASTM C469/C469M [19] | 18 |
| Cường độ chịu kéo trực tiếp | Dog-bone, vùng đo $40 \times 40 \times 80$ | - | 18 |




(a) Thí nghiệm cường độ chịu nén



(b) Thí nghiệm mô đun đàn hồi UHPFRC



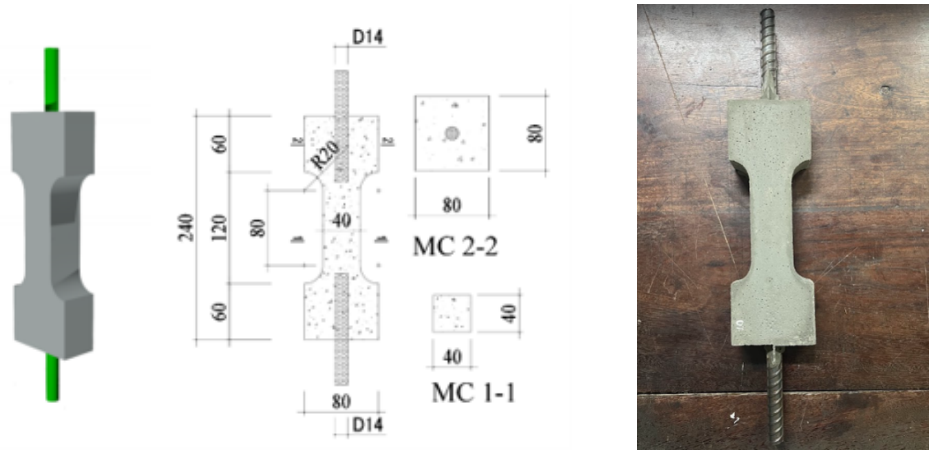
(c) Thí nghiệm kéo trực tiếp UHPFRC

Hình 3. Thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ học của UHPFRC

Thí nghiệm mô đun đàn hồi tham khảo quy trình thí nghiệm của ASTM C469/C469M, đo biến dạng dọc trục bằng 03 tem điện trở chiều dài 90 mm đặt lệch nhau 1 góc 120° dán dọc mẫu thí nghiệm kết hợp với bộ đọc số liệu TDS 730. Mẫu được gia tải theo chu kỳ nén với tốc độ tăng ứng suất $1 \pm 0{,}05$ MPa/s. Mô đun đàn hồi được xác định từ đường quan hệ ứng suất – biến dạng với điểm đầu với biến dạng tương ứng với ứng suất khoảng 5% cường độ nén ($f'_c$) và điểm cuối ứng với ứng suất khoảng 40% $f'_c$. Mẫu thí nghiệm và hình ảnh thí nghiệm được thể hiện trong Hình 3.

Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo trực tiếp mẫu thí nghiệm được thiết kế dạng thắt cổ chai (dog-bone) với tổng chiều dài $L = 240$ mm. Hai đầu mẫu có tiết diện $80 \times 80$ mm để neo cốt thép và

gá vào hệ gia tải, vùng làm việc ở giữa được thu hẹp còn 40 × 40 mm với chiều dài khảo sát 80 mm. Kích thước tiết diện thu hẹp 40 × 40 mm được lựa chọn dựa trên chiều dài sợi lớn nhất, cạnh nhỏ nhất của vùng làm việc lớn hơn 3 lần chiều dài sợi ($L_f$). Chi tiết mẫu thí nghiệm được trình bày trong Hình 4.




(a) Kích thước hình học mẫu thí nghiệm kéo trực tiếp

(b) Mẫu thí nghiệm cường độ chịu kéo

Hình 4. Kích thước hình học mẫu thí nghiệm kéo trực tiếp

Thí nghiệm kéo trực tiếp được thực hiện trên máy thí nghiệm servo thủy lực với tốc độ gia tải trong khoảng 0,1 mm/phút. Biến dạng dọc trục tại vùng khảo sát được đo bằng tem điện trở có chiều dài đo 60 mm, gắn dọc theo trục mẫu trên vùng tiết diện thu hẹp. Tem điện trở được ghi nhận thông qua bộ thu thập dữ liệu TDS-730. Đồng thời, chuyển vị của máy thí nghiệm cũng được ghi lại để theo dõi biến dạng tổng thể của hệ mẫu (elongation) dài 240 mm.

## 3. Kết quả thí nghiệm

### *3.1. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén*

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén tại 28 ngày tuổi của 06 cấp phối với các hàm lượng sợi khác nhau thay đổi từ 0% tới 2,5%, mỗi cấp phối 03 mẫu được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của mẫu UHPFRC

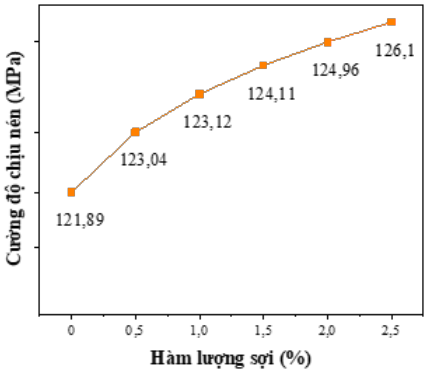
| Cấp phối | Tải trọng phá hoại mẫu (kN) | | | COV (%) | Cường độ chịu nén trung bình (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| | M1 | M2 | M3 | | |
| 0% | 952 | 955 | 965 | 0,72 | 121,89 |
| 0,5% | 958 | 966 | 972 | 0,73 | 123,04 |
| 1% | 971 | 964 | 966 | 0,37 | 123,12 |
| 1,5% | 961 | 977 | 981 | 1,05 | 124,11 |
| 2% | 962 | 984 | 991 | 1,54 | 124,96 |
| 2,5% | 1013 | 990 | 967 | 1,90 | 126,1 |

Hình 5 và Hình 6 trình bày dạng phá hủy khi nén và ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến cường độ chịu nén của UHPFRC. Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ chịu nén trung bình của UHPFRC trong nghiên cứu này ở tuổi 28 ngày dao động từ 121,89 MPa đến 126,10 MPa khi hàm lượng sợi thép

thay đổi từ 0% đến 2,5%. Khi hàm lượng sợi tăng từ 0% đến 2,5%, cường độ nén tăng từ 121,89 MPa lên 126,10 MPa, tương ứng mức tăng khoảng 3,45%. Mức tăng này tương đối nhỏ, cho thấy cường độ nén của UHPFRC chủ yếu được chi phối bởi nền vật liệu đặc chắc, trong khi vai trò của sợi thép đối với cường độ nén chủ yếu trong việc hạn chế phát triển vi nứt và tham gia ít trong việc hạn chế biến dạng ngang khi nén. Xu hướng này phù hợp với các nghiên cứu trước đây [4–8], trong đó sợi thép có ảnh hưởng mạnh hơn đến ứng xử kéo, uốn, độ dai và năng lượng phá hủy so với cường độ nén. Hệ số biến thiên COV của các cấp phối đều nhỏ hơn 2%, chứng tỏ kết quả thí nghiệm có độ ổn định đối với thí nghiệm nén.



Hình 5. Mẫu UHPFRC bị phá hoại khi nén




Hình 6. Ảnh hưởng hàm lượng sợi đến cường độ chịu nén của UHPFRC

### *3.2. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi*

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi tại 28 ngày tuổi của 06 cấp phối với các hàm lượng sợi khác nhau thay đổi từ 0% tới 2,5%, mỗi cấp phối 03 mẫu được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của mẫu UHPFRC

| Cấp phối | Giá trị mô đun đàn hồi (GPa) | | | COV (%) | Giá trị mô đun đàn hồi trung bình (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| | M1 | M2 | M3 | | |
| 0% | 44,582 | 44,720 | 43,960 | 0,92 | 44,421 |
| 0,5% | 44,870 | 44,120 | 44,680 | 0,87 | 44,557 |
| 1% | 45,380 | 45,730 | 45,320 | 0,49 | 45,476 |
| 1,5% | 45,683 | 45,972 | 45,380 | 0,65 | 45,678 |
| 2% | 46,023 | 46,230 | 46,830 | 0,92 | 46,361 |
| 2,5% | 47,553 | 46,921 | 46,289 | 1,1 | 46,921 |

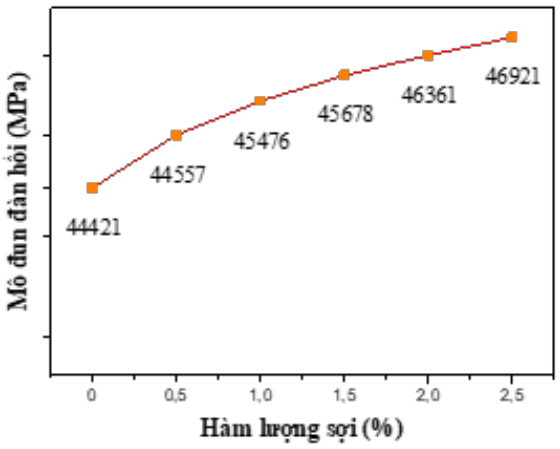
Để thuận tiện cho quá trình tính toán, giá trị mô đun đàn hồi thường được tính toán thông qua cường độ chịu nén. Bảng 6 trình bày một số công thức tính toán mô đun đàn hồi thông qua cường độ chịu nén theo một số nghiên cứu với UHPFRC.

Từ kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi và biểu đồ ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến mô đun đàn hồi của UHPFRC (Hình 7) cho thấy mô đun đàn hồi trung bình của UHPFRC tăng nhẹ từ 44,42 GPa ở mẫu không sợi lên 46,921 GPa tại ($V_f$ = 2,5%), tương ứng tăng khoảng 5,63%. Các cấp phối có hàm lượng sợi 0,5%, 1,0%, 1,5% và 2,0% lần lượt đạt 44,55 GPa, 45,47 GPa, 45,67 GPa và 46,36 GPa. Xu hướng này xuất phát từ mô đun đàn hồi của sợi thép lớn hơn nền xi măng, góp phần tăng độ cứng của vật liệu composite. Tuy nhiên, do hàm lượng sợi chỉ chiếm tỷ lệ nhỏ nên mức cải thiện không

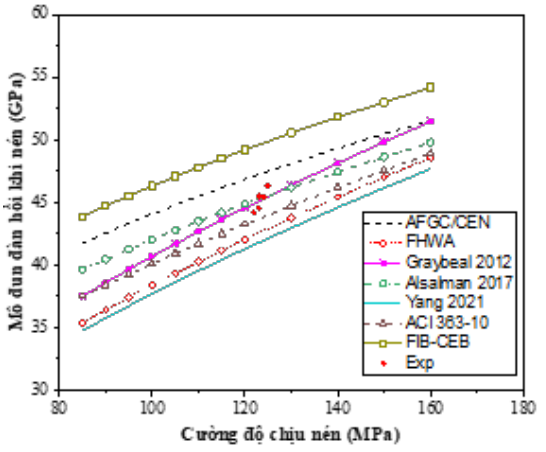
đáng kể. Mô đun đàn hồi của UHPFRC vẫn chủ yếu phụ thuộc vào độ đặc chắc của bê tông nền, tỷ lệ nước/chất kết dính, cấp phối hạt và điều kiện bảo dưỡng. Vì vậy, vai trò chính của sợi thép là cải thiện khả năng chịu kéo, kiểm soát vết nứt và nâng cao ứng xử sau nứt hơn là làm tăng độ cứng đàn hồi ban đầu.

Bảng 6. Một số công thức dự báo mô đun đàn hồi từ cường độ chịu nén

| Ref | Tiêu chuẩn/ Tác giả đề xuất | Công thức dự báo (GPa) | Phạm vi áp dụng |
|---|---|---|---|
| [20] | AFGC | $E_c = 9{,}5 f_c^{1/3}$ | $120 \le f_c$ |
| [21] | FHWA (2013) | $E_c = 3{,}84 f_c^{0{,}5}$ | $120 \le f_c \le 193$ |
| [22] | Graybeal (2012) | $E_c = 4{,}069 f_c^{0{,}5}$ | $97 \le f_c \le 179$ |
| [23] | Alsalman et al. (2017) | $E_c = 8{,}01 f_c^{0{,}36}$ | $31 \le f_c \le 235$ |
| [24] | Yang et al. (2021) | $E_c = 3{,}77 f_c^{0{,}5}$ | $120 \le f_c$ |
| [25] | ACI 363-10 | $E_c = 3{,}32 f_c^{0{,}5} + 6{,}9$ | $60 \le f_c$ |
| [26] | fib-CEB | $E_c = 21{,}5 \left(\frac{f_c}{10}\right)^{1/3}$ | $60 \le f_c$ |




Hình 7. Ảnh hưởng hàm lượng sợi đến mô đun đàn hồi của UHPFRC




Hình 8. Mô đun đàn hồi theo các mô hình dự báo khác nhau

Hình 8 thể hiện kết quả tính toán mô đun đàn hồi theo một số công thức dự báo và kết quả thực nghiệm. Các kết quả cho thấy các giá trị thực nghiệm nhìn chung nằm trong phạm vi dự báo của các mô hình khảo sát. Graybeal (2012) và Alsalman et al. (2017) cho mức độ phù hợp tốt nhất, với sai số trung bình khoảng 1,4%, trong khi ACI 363-10 và AFGC có sai số khoảng 3,7–4,0%. Các mô hình FHWA và Yang et al. có xu hướng dự báo thấp, còn fib-CEB dự báo cao hơn thực nghiệm.

### *3.3. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo trực tiếp*

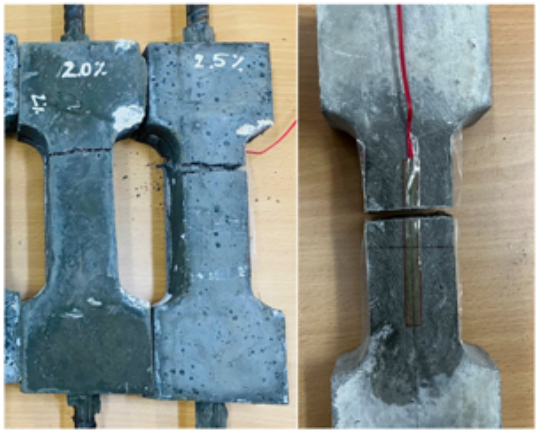
Kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo trực tiếp tại 28 ngày tuổi của các mẫu thí nghiệm cường độ chịu kéo trực tiếp được trình bày trong Bảng 7.

Hình 9 là hình ảnh dạng phá hoại của mẫu UHPFRC chịu kéo trực tiếp trong nghiên cứu. Các mẫu UHPFRC phá hoại bởi một vết nứt chính cục bộ hình thành trong vùng tiết diện thu hẹp của mẫu dog-bone. Vết nứt phát triển gần vuông góc với phương kéo, không xuất hiện nứt xiên hoặc tách dọc, cho thấy mẫu được chế tạo và gia tải tương đối đúng tâm. Sau nứt, biến dạng tập trung tại một mặt nứt chính thay vì phân bố thành nhiều vi nứt dọc chiều dài đo. Dạng phá hoại này khác với ứng xử hóa

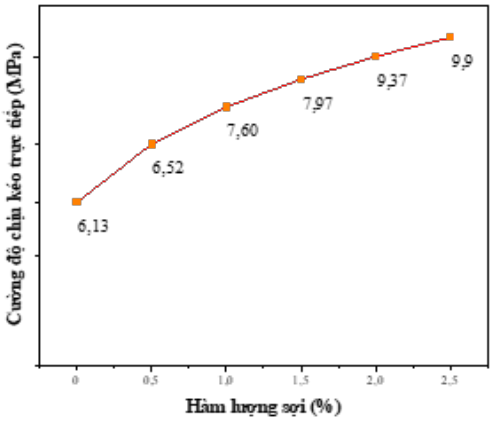
cứng biến dạng (strain-hardening) của UHPFRC có nứt phân tán, thường đạt được khi bê tông nền có cường độ rất cao, hàm lượng sợi lớn và sử dụng hệ sợi lai [11–16].

Bảng 7. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo trực tiếp của mẫu UHPFRC

| Cấp phối | Cường độ chịu kéo trực tiếp (MPa) | | | COV (%) | Giá trị cường độ chịu kéo trung bình (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| | M1 | M2 | M3 | | |
| 0% | 5,9 | 6,2 | 6,3 | 3,4 | 6,13 |
| 0,5% | 6,3 | 6,6 | 6,7 | 3,7 | 6,52 |
| 1% | 7,3 | 7,9 | 7,6 | 3,9 | 7,60 |
| 1,5% | 7,7 | 7,9 | 8,3 | 4,0 | 7,97 |
| 2% | 9,8 | 9,4 | 8,9 | 4,8 | 9,37 |
| 2,5% | 10,5 | 9,7 | 9,5 | 5,2 | 9,9 |




Hình 9. Dạng phá hoại khi kéo trực tiếp mẫu UHPFRC




Hình 10. Ảnh hưởng hàm lượng sợi đến cường độ chịu kéo trực tiếp của UHPFRC

Từ kết quả cường độ chịu kéo trong Bảng 7 và Hình 10 cho thấy cường độ kéo trực tiếp trung bình của UHPFRC tăng từ 6,13 MPa ở mẫu không sợi lên 9,90 MPa tại ($V_f$ = 2,5%), tương ứng tăng khoảng 61,5%. Mức tăng này lớn hơn đáng kể so với cường độ nén và mô đun đàn hồi, khẳng định vai trò chủ yếu của sợi thép trong việc cải thiện khả năng chịu kéo và ứng xử sau nứt. Tuy nhiên, tốc độ tăng cường độ chịu kéo không tăng tuyến tính mà tăng nhanh ở giai đoạn sợi có hàm lượng nhỏ hơn 2%, nguyên nhân chính do hiệu ứng nhóm sợi , khi ở hàm lượng sợi cao thông số chính ảnh hưởng bởi sự định hướng sợi và bám dính giữa sợi và bê tông nền.

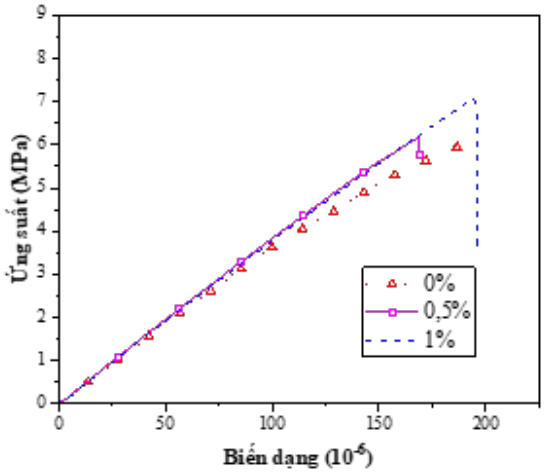
### *3.4. Ứng xử UHPFRC khi chịu kéo và năng lượng phá hoại khi kéo*

a. Ứng xử trước nứt

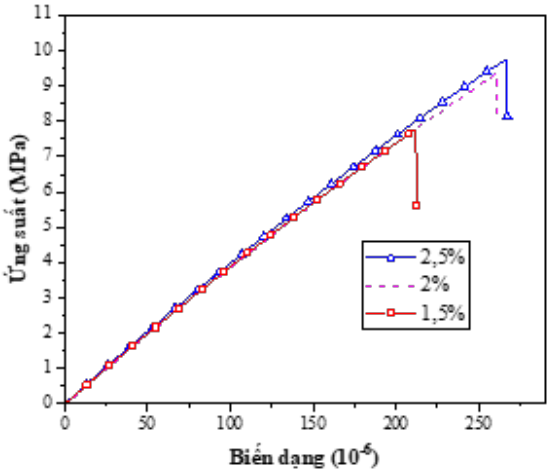
Hình 11 và Hình 12 là quan hệ ứng suất biến dạng của các mẫu thí nghiệm có hàm lượng sợi từ 0% tới 2,5%, Kết quả biến dạng này được đo đạc từ tem điện trở và máy TDS 730.

Từ kết quả Hình 11 và Hình 12 cho thấy quan hệ ứng suất biến dạng khi kéo dọc trục của UHPFRC trước thời điểm nứt gần tuyến tính, phản ánh vật liệu chủ yếu làm việc đàn hồi trước nứt. Mô đun đàn hồi khi kéo tăng từ 33,87 GPa lên 39,50 GPa khi ($V_f$) đạt 2,5%, nhưng mức tăng nhỏ hơn đáng kể so với cường độ kéo. Vì vậy, vai trò nổi bật của sợi thép là tăng khả năng chịu kéo và kiểm soát vi nứt hơn là cải thiện độ cứng ban đầu. Biến dạng nứt lớn hơn bê tông thường nhờ độ đặc chắc của UHPFRC,

độ rỗng thấp và khả năng hạn chế sự phát triển vi nứt của sợi thép. Bảng 8 cho thấy ứng xử kéo trước nứt của UHPFRC chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi hàm lượng sợi thép. Khi $V_f$ tăng từ 0% đến 2,5%, cường độ khi nứt $f_{ct,el}$ tăng từ 6,13 MPa lên 9,90 MPa, trong khi biến dạng khi nứt tăng từ $181 \times 10^{-6}$ lên $250{,}6 \times 10^{-6}$. Điều này chứng tỏ việc bổ sung sợi thép không chỉ làm tăng khả năng chịu kéo của vật liệu mà còn làm tăng khả năng biến dạng trước khi hình thành vết nứt chính.




Hình 11. Quan hệ ứng suất và biến dạng khi kéo của UHPFRC với hàm lượng sợi 0% tới 1% trước thời điểm nứt



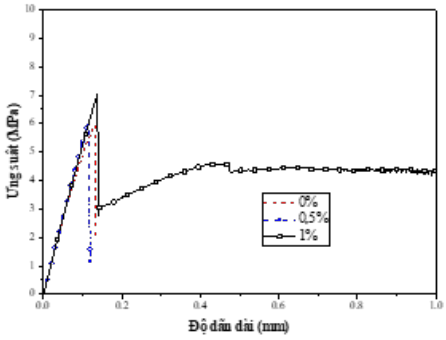

Hình 12. Quan hệ ứng suất và biến dạng khi kéo của UHPFRC với hàm lượng sợi 1,5% tới 2,5% trước thời điểm nứt

Bảng 8. Các đặc trưng biến dạng khi kéo trực tiếp UHPFRC

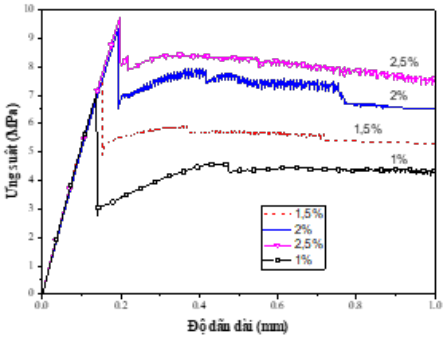
| Hàm lượng sợi ($V_f$) (%) | Cường độ khi nứt ($f_{ct,el}$) (MPa) | Biến dạng khi nứt ($10^{-6}$) | Mô đun đàn hồi khi kéo ($E_{ct}$) (GPa) |
|---|---|---|---|
| 0 | 6,13 | 181 | 33,87 |
| 0,5 | 6,52 | 184 | 35,43 |
| 1,0 | 7,60 | 203,2 | 37,40 |
| 1,5 | 7,97 | 208 | 38,32 |
| 2,0 | 9,37 | 241 | 38,88 |
| 2,5 | 9,90 | 250,6 | 39,50 |

b. Ứng xử sau nứt và ứng suất - độ mở rộng vết nứt của UHPFRC

Hình 13 và Hình 14 thể hiện quan hệ ứng suất và độ giãn dài tuyệt đối của mẫu UHPFRC chịu kéo trực tiếp. Nhóm mẫu có hàm lượng sợi 0% và 0,5% không có sự làm việc sau khi mẫu xuất hiện vết nứt, ứng suất bị mất hoàn toàn sau khi nứt. Các mẫu có hàm lượng sợi từ 1% tới 2,5% cho thấy rõ khả năng chịu kéo của mẫu sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên. Cơ chế chung của các nhóm mẫu này là sau giai đoạn đàn hồi, mẫu bị nứt và ứng suất chịu kéo bị giảm đột ngột sau đó có khả năng duy trì ứng suất chịu kéo tới độ giãn dài tuyệt đối tới 1 mm. Mức suy giảm và khả năng phục hồi ứng suất trong giai đoạn sau nứt ảnh hưởng lớn bởi hàm lượng cốt sợi. Hàm lượng 2,5% cho ứng suất dư đạt 8,5 MPa tương ứng đến khoảng 85% ứng suất đỉnh khi hình thành khe nứt. Nguyên nhân chính là do số lượng sợi bắc qua mặt nứt tăng lên, qua đó nâng cao hiệu ứng cầu nối giữa các vết nứt. Từ quan hệ ứng suất và độ giãn dài tuyệt đối cho thấy ngoài quan hệ ứng suất biến dạng thể hiện sự làm việc trước nứt, cần xây dựng mối quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt để đánh giá ứng xử khi kéo của UHPFRC.



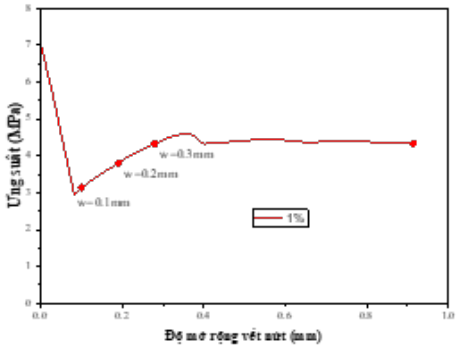

Hình 13. Quan hệ ứng suất và độ giãn dài tuyệt đối khi kéo của UHPFRC với hàm lượng sợi 0% và 0,5%



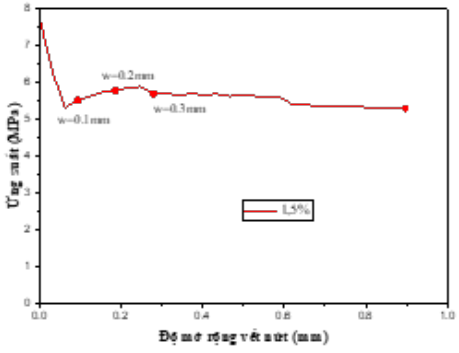

Hình 14. Quan hệ ứng suất và độ giãn dài tuyệt đối khi kéo của UHPFRC với hàm lượng sợi 1% tới 2,5%

c. Năng lượng phá hủy và năng lượng hấp thụ tại các độ mở rộng khe nứt

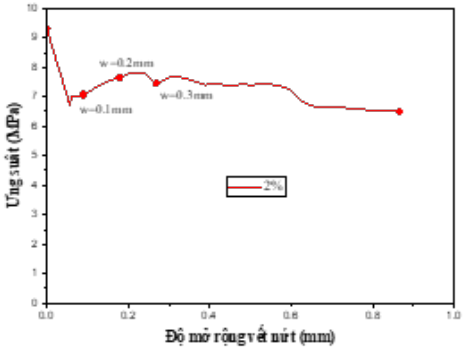
Từ quan hệ ứng suất biến dạng (đo bằng strain gauge) và quan hệ ứng suất độ giãn dài tuyệt đối. Tiến hành xây dựng quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt trên khoảng đo 80 mm với chỉ có một vết nứt cục bộ. Hình 15 trình bày quan hệ ứng suất và độ mở rộng vết nứt của các cấp phối UHPFRC có hàm lượng sợi từ 1% tới 2,5%. Qua biểu đồ này, có thể thấy rõ sự duy trì ứng suất kéo khi UHPFRC nứt với từng mức độ bề rộng khe nứt khác nhau.



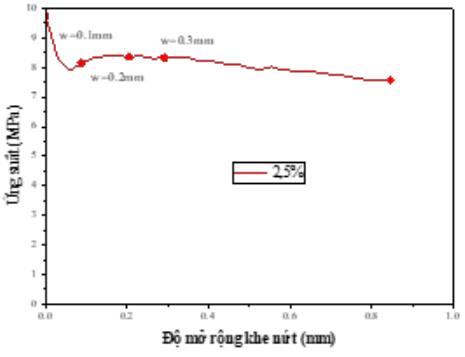

(a) Hàm lượng sợi 1%




(b) Hàm lượng sợi 1,5%




(c) Hàm lượng sợi 2%




(d) Hàm lượng sợi 2,5%

Hình 15. Quan hệ ứng suất và độ mở rộng vết nứt khi kéo của UHPFRC

Trong thí nghiệm kéo trực tiếp, quan hệ ứng suất–độ giãn dài được nhóm tác giả thực hiện tới khi độ giãn dài tổng đạt khoảng 1 mm. Tuy nhiên, tại thời điểm này ứng suất kéo trong mẫu vẫn chưa giảm hoàn toàn về 0, nghĩa là quá trình cầu nối sợi qua mặt nứt vẫn chưa kết thúc. Mặc dù khi làm việc trong kết cấu, các khuyến nghị đều đưa ra chỉ nên lấy ứng suất tới giới hạn vết nứt là 0,3 mm [8–12] tuy nhiên để tính năng lượng phá hoại hoàn toàn cần phải có quan hệ ứng suất–độ mở vết nứt cho đến khi ứng suất giảm về 0. Phần năng lượng tương ứng với nhánh suy giảm ứng suất về 0 được ngoại suy tuyến tính về 0. Theo khuyến nghị của NF P 18-710 [27] khi độ mở rộng khe nứt đạt tới $L_f/2$ (6,5 mm) thì mẫu thí nghiệm mất hoàn toàn khả năng chịu kéo do mất hoàn toàn lực dính giữa sợi và bê tông nền. Ở mức mở vết nứt này, phần lớn cơ chế dính bám ban đầu giữa sợi và nền đã bị phá vỡ, quá trình chịu lực chủ yếu do ma sát trượt và kéo tuột sợi. Quan hệ ứng suất mở rộng khe nứt là một thông số quan trọng trong các mô phỏng số về UHPFRC [28, 29].

Năng lượng phá hủy kể đến phần ngoại suy được tính theo công thức (1)

$$G_{t,u} = \int_0^{w_{\exp}} \sigma(w)\, dw + \frac{1}{2}\,\sigma_{end}\left(w_u - w_{\exp}\right) \tag{1}$$

trong đó $G_{t,u}$ là năng lượng phá hủy khi kéo (kJ/m$^2$); $w_{\exp}$ là độ mở vết nứt tại thời điểm kết thúc thí nghiệm (mm); $\sigma_{end}$ là ứng suất kéo tại thời điểm kết thúc thí nghiệm (MPa); $w_u = L_f/2 = 6{,}5$ (mm) là độ mở vết nứt giới hạn của phần ngoại suy. Kết quả tính toán năng lượng hấp thụ tại các bề rộng vết nứt và năng lượng phá hoại được trình bày trong Bảng 9.

Bảng 9. Năng lượng hấp thụ và năng lượng phá hủy của UHPFRC khi chịu kéo (kJ/m$^2$)

| Hàm lượng sợi | $G_f$ (0,1 mm) | $G_f$ (0,2 mm) | $G_f$ (0,3 mm) | $G_{t,u}$ đến 6,5 mm ($L_f/2$) |
|---|---|---|---|---|
| 1,0% | 0,468 | 0,819 | 1,236 | 16,06 |
| 1,5% | 0,605 | 1,176 | 1,757 | 19,90 |
| 2,0% | 0,760 | 1,510 | 2,278 | 24,60 |
| 2,5% | 0,836 | 1,672 | 2,506 | 28,23 |

Theo NF P 18-710, UHPFRC không chỉ được đánh giá ứng xử khi kéo bằng cường độ kéo cực đại, mà còn phải xét đến phần năng lượng hấp thụ sau nứt. Điều này phù hợp với ứng xử khi kéo của UHPFRC, vì sau khi xảy ra vết nứt cục bộ (crack localization) ứng xử mềm hóa cần được mô tả bằng quan hệ ứng suất–độ mở vết nứt $\sigma - w$, thay vì chỉ dùng quan hệ ứng suất–biến dạng. Điều kiện đánh giá tính "không giòn" theo hướng dẫn này được quy định theo công thức (2). Đại lượng này là ứng suất sau nứt trung bình hiệu quả trong khoảng mở vết nứt từ 0 đến 0,3 mm. Hệ số 1,25 của vế trái của công thức (2) với ý nghĩa làm giảm ứng suất sau nứt để xét đến ảnh hưởng bất lợi của định hướng sợi.

$$\frac{1}{0{,}3}\int_0^{0{,}3} \frac{\sigma(w)}{1{,}25}\, dw \geq \max\left(0{,}4 f_{ctm,el},\, 3\ \text{MPa}\right) \tag{2}$$

Tỷ số $n_f$ được xác định bằng tỷ số giữa ứng suất sau nứt ở vế trái và giá trị giới hạn max(0,4$f_{ct,el}$; 3 MPa) của vế phải của công thức (2). Vật liệu thỏa mãn điều kiện không giòn khi $n_f \geq 1$. Từ kết quả Bảng 10 cho thấy các cấp phối có hàm lượng sợi không nhỏ hơn 1% cho năng lượng phá hủy đủ để đánh giá tính không giòn của UHPFRC và cần kể đến khả năng chịu kéo này trong các tính toán về cấu kiện sử dụng loại bê tông này.

Bảng 10. Đánh giá độ dẻo thông qua năng lượng khi kéo trực tiếp

| $V_f$ (%) | $G_f$ (0,3 mm) (kJ/m$^2$) | $f_{ct,el}$ (MPa) | Max (0,4$f_{ctm,el}$, 3 MPa) | Tỷ số độ dẻo $n_f$ | Đánh giá đạt độ dẻo cho phép |
|---|---|---|---|---|---|
| 1,0 | 1,236 | 7,60 | 3,04 | 1,08 | Đạt |
| 1,5 | 1,757 | 7,97 | 3,19 | 1,47 | Đạt |
| 2,0 | 2,278 | 9,37 | 3,75 | 1,62 | Đạt |
| 2,5 | 2,506 | 9,90 | 3,96 | 1,69 | Đạt |

## 4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thực hiện đánh giá các chỉ tiêu cơ học gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo của UHPFRC với 06 hàm lượng cốt sợi thép từ 0% tới 2,5%. Từ các kết quả có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Hàm lượng sợi thép ảnh hưởng tương đối ít đến cường độ nén và mô đun đàn hồi của UHPFRC. Khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0% lên 2,5%, cường độ nén tăng từ 121,89 MPa lên 126,10 MPa, còn mô đun đàn hồi tăng từ 44,42 GPa lên 46,92 GPa. Điều này cho thấy các đặc trưng trước nứt chủ yếu phụ thuộc vào sự đặc chắc của bê tông nền, trong khi sợi thép chỉ góp phần hạn chế vi nứt và tăng nhẹ độ cứng.

- Ảnh hưởng của sợi thép thể hiện rõ đến ứng xử khi kéo trực tiếp của UHPFRC. Cường độ kéo tăng từ 6,13 MPa lên 9,90 MPa khi hàm lượng sợi tăng từ 0% lên 2,5%, tương ứng khoảng 61,5%, nhờ cơ chế cầu nối sợi qua mặt nứt. Khi UHPFRC xuất hiện vết nứt các nhóm mẫu có hàm lượng sợi không nhỏ hơn 1% duy trì được khả năng chịu kéo sau khi xuất hiện vết nứt.

- Các cấp phối có hàm lượng sợi $V_f \geq 1{,}0$ thỏa mãn điều kiện không giòn theo NF P 18-710; tỷ số độ dẻo $n_f$ tăng từ 1,08 lên 1,69 khi hàm lượng sợi tăng từ 1,0% lên 2,5%.

## Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng ChatGPT (OpenAI) nhằm rà soát chính tả. Các tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

## Tài liệu tham khảo

[1] Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z., Fang, Z. (2015). A review on ultra-high-performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 96: 368–377.

[2] Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z. (2015). A review on ultra-high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101:741–751.

[3] ASTM C1856/C1856M-17 (2017). *Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high-performance concrete*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.

[4] Hung, C.-C., El-Tawil, S., Chao, S.-H. (2021). A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: Behavior, analysis, and design. *Journal of Structural Engineering*, 147(9): 03121001.

[5] Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H. (2016). Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high-strength cement-based materials (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, 71:97–109.

[6] Liu, Z., El-Tawil, S., Hansen, W., Wang, F. (2018). Effect of slag cement on the properties of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 190:830–837.

[7] Abdallah, S., Fan, M., Zhou, X. (2017). Pull-out behaviour of hooked-end steel fibres embedded in ultra-high-performance mortar with various W/B ratios. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2):301–313.

[8] Wu, Z., Khayat, K. H., Shi, C. (2017). Effect of nano-SiO2 particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 95:247–256.

[9] Yoo, D. Y., Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 73:267–280.

[10] Chan, Y. W., Chu, S. H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7):1167–1172.

[11] Karim, R., Shafei, B. (2024). Ultra-high-performance concrete under direct tension: Investigation of a hybrid of steel and synthetic fibers. *Structural Concrete*, 25(1):423–439.

[12] Savino, V., Lanzoni, L., Tarantino, A. M., Viviani, M. (2018). Tensile constitutive behavior of high- and ultra-high-performance fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 186:525–536.

[13] Cadoni, E., Forni, D., Bonnet, E., Dobrusky, S. (2019). Experimental study on direct tensile behaviour of UHPFRC under high strain rates. *Construction and Building Materials*, 218:667–680.

[14] Sturm, A. B. (2020). *Mechanics-based approaches for the flexural and shear behaviour of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete beams*. Phd thesis, University of Adelaide, Australia.

[15] Yang, J., Chen, B., Su, J., Xu, G., Zhang, D., Zhou, J. (2022). Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(3): 363–387.

[16] Du, W., Yu, F., Qiu, L., Guo, Y., Wang, J., Han, B. (2024). Effect of steel fibers on tensile properties of ultra-high-performance concrete: A review. *Materials*, 17(5):1108.

[17] Yoo, D. Y., Yoon, Y. S. (2016). A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 (2):125–142.

[18] ASTM C39/C39M-26 (2026). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[19] ASTM C469/C469M-22 (2022). *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[20] AFGC (2013). *Ultra high performance fibre-reinforced concretes: Recommendations*. Association Française de Génie Civil, Paris, France.

[21] Russell, H. G., Graybeal, B. A. (2013). *Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community*. Report No. FHWA-HRT-13-060, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, USA.

[22] Graybeal, B. A. (2012). *Material property characterization of ultra-high performance concrete*. Report No. FHWA-HRT-06-103, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, USA.

[23] Alsalman, A., Dang, C. N., Prinz, G. S., Hale, W. M. (2017). Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153:918–928.

[24] Yang, J., Chen, B., Nuti, C. (2021). Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 302:124104.

[25] ACI 363R-10 (2010). *Report on high-strength concrete (ACI 363R-10)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

[26] fib (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn, Berlin, Germany.

[27] NF P18-710 (2016). *National addition to Eurocode 2 – Design of concrete structures: Specific rules for ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)*. Association Française de Normalisation, Paris, France.

[28] Nghia, H. H., Chinh, M. V. (2026). Axial performance of UHPC-filled steel tube composite columns. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) – HUCE*, 20(1):113–126.

[29] Mai, V.-C., Nguyen, X. D., Nguyen, C. D. (2023). Numerical simulation for the flexural response of large-span UHPFRC prestressed composite box girder. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) – HUCE*, 17(4):80–94.