

# Đặc trưng cơ học của bê tông cường độ cao chứa silica fume với hàm lượng sợi thép khác nhau

Nguyễn Ngọc Thành<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa Tp. HCM, 268 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Tp. HCM, Việt Nam

<sup>2</sup> Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Phường Linh Trung, Thành phố Thủ Đức, Tp. HCM, Việt Nam

**TỪ KHOÁ**

Cường độ chịu nén  
Mô đun đàn hồi  
Hệ số Poisson  
Cường độ chịu kéo khi bẻ  
Bê tông cường độ cao

**TÓM TẮT**

Nghiên cứu này chủ yếu tập trung khảo sát đặc trưng cơ học của bê tông cường độ cao (HSC) sử dụng 8% silica fume (SF) thay thế xi măng Portland kết hợp với hàm lượng sợi thép thấp nhằm khám phá hiệu quả của việc sử dụng hàm lượng sợi thép ở mức thấp trong việc cải thiện đặc trưng cơ học của HSC sử dụng SF. Ba cấp phối HSC được thiết kế với tỷ lệ nước/chất kết dính là 0,32 và tỷ lệ sợi thép thêm vào trong hỗn hợp bê tông lần lượt là 0%; 0,4% và 0,6% theo thể tích bê tông. Đặc trưng cơ học của HSC được khảo sát trong nghiên cứu này bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson và cường độ chịu kéo khi bẻ. Kết quả chỉ ra rằng việc sử dụng sợi thép với hàm lượng thấp đã cải thiện đặc tính cơ học của HSC sử dụng SF, cụ thể: cường độ chịu nén cao hơn từ 2,83 – 8,82%, mô đun đàn hồi cao hơn từ 6,18 – 8,68%, hệ số Poisson thấp hơn 27,41 – 30,46% và cường độ chịu kéo khi bẻ cao hơn 29,47 – 46,40% so với HSC không sử dụng sợi thép. Mối tương quan thuận giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi bẻ và mối quan hệ nghịch giữa mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của các cấp phối bê tông cũng được thiết lập. Tóm lại, việc sử dụng sợi thép ở mức 0,6% theo thể tích trong nghiên cứu này đã đem lại hiệu quả tối ưu trong việc cải thiện đặc tính cơ học của HSC sử dụng SF.

**KEYWORDS**

Compressive strength  
Elastic modulus  
Poisson's ratio  
Splitting tensile strength  
High-strength concrete

**ABSTRACT**

This study mainly focused on investigating the mechanical properties of high-strength concrete (HSC) using 8% silica fume (SF) as a Portland cement replacement combining with low steel fiber contents to explore the effectiveness of using low steel fiber contents in improving the mechanical properties of HSC using SF. Three HSC mixture proportions were designed with a water/binder ratio of 0.32 and steel fiber additions to the concrete mixture of 0%, 0.4%, and 0.6% by volume of concrete. The mechanical properties of HSC investigated in this study included compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio, and splitting tensile strength. The experimental results showed that the use of low steel fiber contents improved the mechanical properties of HSC using SF, specifically: compressive strength higher by 2.83 – 8.82%, elastic modulus higher by 6.18 – 8.68%, Poisson's ratio lower by 27.41 – 30.46%, and splitting tensile strength higher by 29.47 – 46.40% than that of HSC without steel fiber. The positive correlation between compressive strength and splitting tensile strength and the negative correlation between elastic modulus and Poisson's ratio of concretes were also established. In summary, the use of steel fibers at 0.6% by volume was effective in improving the mechanical properties of HSC using SF.

**1. Giới thiệu**

Nhu cầu xã hội ngày càng tăng cao, kéo theo nhu cầu xây dựng các công trình nhà ở và cơ sở hạ tầng cũng cần phải được đẩy mạnh. Để đáp ứng nhu cầu đó, bê tông cường độ cao (HSC) là một trong những vật liệu xây dựng được nghiên cứu và phát triển để đưa vào ứng dụng thực tế [1,2]. Khác với bê tông thông thường, HSC được chế tạo từ hệ nguyên vật liệu bao gồm có xi măng, cốt liệu nhỏ, cốt liệu lớn kết hợp với việc sử dụng phụ gia khoáng vô cơ hoạt tính và phụ gia hóa học [3]. Silica fume (SF) - sản phẩm phụ của ngành công nghiệp sản xuất

silicon và hợp kim silicon - là một trong các phụ gia khoáng vô cơ hoạt tính có cỡ hạt cực mịn với tỉ diện tích bề mặt cao hơn so với xi măng Portland [4]; do đó, SF được sử dụng để thay thế một phần xi măng trong việc chế tạo bê tông [5]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng SF đóng vai trò như một chất lấp đầy hiệu quả trong việc cải thiện cường độ và độ bền của bê tông thông qua việc làm giảm lỗ rỗng và cải thiện vùng chuyển tiếp bề mặt giữa hệ nền và cốt liệu [5,6]. Chính vì thế, HSC có những ưu điểm vượt trội hơn so với bê tông thông thường như đặc trưng cơ học cao hơn, dẫn đến được ứng dụng rộng rãi cho các công trình cao tầng và cơ sở hạ tầng với yêu cầu về khả năng chịu lực cao,

\*Liên hệ tác giả: nnthanh@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 30/05/2025, sửa xong ngày 04/06/2025, chấp nhận đăng ngày 05/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.1022>

tính thấm thấp và độ bền lâu [7].

Tuy nhiên, HSC lại có nhược điểm phá hủy giòn và đột ngột dưới tác động của tải trọng. Để khắc phục nhược điểm này, các loại sợi đã được đề xuất đưa vào trong HSC [8,9]. Nhìn chung, sợi có nhiều dạng hình học (sợi thẳng, sợi móc, sợi gợn sóng và sợi xoắn), chiều dài cùng đường kính khác nhau. Trong cùng một khối thể tích nhất định, hình dạng sợi nhỏ tạo ra số lượng sợi cao hơn khi so với hình dạng sợi lớn. Điều này dẫn đến số lượng các sợi nhỏ hơn được phân bố dày đặc hơn trong HSC và có thể kiểm soát hiệu quả sự phát triển các vết nứt nhỏ; trong khi đó, các sợi dài hơn có thể cải thiện cường độ tới hạn thông qua việc kiểm soát sự lan truyền các vết nứt lớn hơn [10]. Chính vì thế, mục đích của việc sử dụng sợi là để làm giảm tính giòn của hệ nền chất kết dính, cải thiện độ dẻo dai, tăng khả năng chống nứt và khả năng chịu uốn và chịu kéo cho HSC [9-11]. Việc cải thiện các đặc tính kỹ thuật của HSC do sợi thường phụ thuộc vào loại sợi (sợi thép, sợi khoáng, hay sợi tổng hợp), hình dáng sợi, tỷ lệ chiều dài so với đường kính sợi và đặc trưng kỹ thuật của sợi [12]. Bên cạnh đó, hàm lượng sợi cũng là yếu tố ảnh hưởng đến việc cải thiện này. Hàm lượng sợi thường được sử dụng ở mức 0,25 % đến 2 % theo thể tích bê tông [13]. Nhiều nghiên cứu trước đã chỉ ra việc cải thiện cường độ của bê tông khi bổ sung sợi [14-17]. Điển hình, Ma et al. [14] đã tìm ra sự cải thiện từ 19 – 42 % khi sử dụng sợi thép ngắn có chiều dài 13 mm và tỷ lệ chiều dài so với đường kính sợi là 65 cùng với hàm lượng từ 0 – 2 % theo thể tích bê tông. Trong khi, Atiş and Karahan [15] đã kết luận rằng việc sử dụng sợi chỉ làm gia tăng nhẹ cường độ chịu nén của bê tông. Trái lại, Khaloo et al. [16] đã nhận định việc sử dụng sợi lại làm giảm cường độ chịu nén của bê tông. Iqbal et al. [17] cũng đưa ra xu hướng tương tự về mức độ giảm là 7 % đối với các mẫu bê tông có gia cường

sợi. Nhìn chung, hầu hết các nghiên cứu trước đều tập trung vào ảnh hưởng của việc gia cường sợi với hàm lượng cao (cụ thể 1 %, 2 % và 3 %) đến cường độ của HSC và đưa ra những nhận định trái chiều của việc bổ sung sợi thép vào trong HSC. Trong khi đó, các nghiên cứu về đặc trưng cơ học của HSC sử dụng SF với hàm lượng sợi thép ở mức thấp (tức nhỏ hơn 1 %) vẫn còn rất hạn chế.

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này chủ yếu tập trung khảo sát đặc trưng cơ học của HSC sử dụng SF kết hợp với hàm lượng sợi thép thấp (0,4 % và 0,6 %) nhằm khám phá hiệu quả của việc sử dụng hàm lượng sợi thép thấp trong việc cải thiện đặc trưng cơ học của HSC sử dụng SF và đem lại hiệu quả về kinh tế hơn trong việc chế tạo HSC kết hợp sợi thép. Nghiên cứu này góp phần bổ sung thêm dữ liệu về hiệu quả sử dụng sợi thép với hàm lượng phù hợp để chế tạo HSC ứng dụng trong các công trình yêu cầu về cường độ cao và khả năng chống nứt tốt, các công trình chịu tải trọng động như cầu, đường giao thông, hầm chịu tải lớn, sàn nhà công nghiệp ... kết hợp với mục tiêu về hiệu quả kinh tế hơn.

**2. Thực nghiệm**

**2.1. Hệ nguyên vật liệu**

Chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm xi măng Portland và SF. Xi măng Portland PC40 thỏa mãn theo TCVN 2682 : 2020 [18]; trong khi, SF là phụ phẩm từ ngành công nghiệp sản xuất silicon và hợp kim silicon, với kích thước trung bình chỉ khoảng 0,1 μm, chứa trên 95 % SiO<sub>2</sub> ở dạng vô định hình và thỏa theo TCVN 8827 : 2011 [19]. Thông số kỹ thuật của XM và SF được trình bày ở Bảng 1.

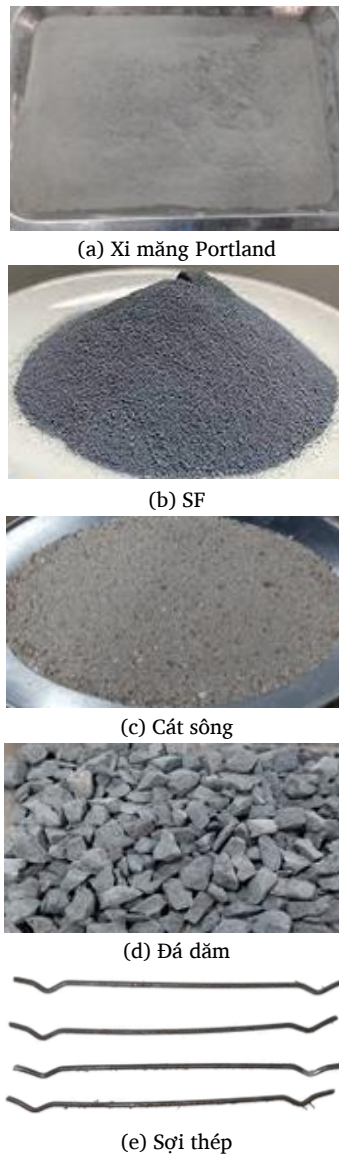
**Bảng 1.** Thông số kỹ thuật của XM và SF.

Chỉ tiêu kỹ thuật	Đơn vị	XM	SF
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,90	2,20
Lượng nước tiêu chuẩn	%	30	-
Thời gian ninh kết			
- Bắt đầu	phút	190	-
- Kết thúc	phút	240	-
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi	MPa	42,5	-
Chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày tuổi	%	-	98,2

Bên cạnh đó, cát sông và đá dăm được sử dụng làm cốt liệu nhỏ và cốt liệu lớn để chế tạo bê tông, cụ thể: cát được dùng là loại cát đã được rửa sạch, lượng bụi, bùn, sét và tạp chất thấp, thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 7570 : 2006 [20]; trong khi, đá dăm là loại đá có tỉ lệ hạt thoi dẹt thấp, hàm lượng bụi, bùn, sét không vượt quá giá trị được quy định trong TCVN 7570 : 2006 [20]. Thông số kỹ thuật của cát sông và đá dăm được trình bày ở Bảng 2. Để khảo sát đặc tính cơ học của HSC, sợi thép được sử dụng là SDS-08060. Hình 1 thể hiện hệ nguyên vật liệu bao gồm (a) xi măng Portland, (b) SF, (c), cát sông, (d) đá dăm và (e) sợi thép sử dụng trong nghiên cứu này. Bảng 3 mô tả thông số kỹ thuật của sợi thép.

**Bảng 2.** Thông số kỹ thuật của cát sông và đá dăm.

Chỉ tiêu kỹ thuật	Đơn vị	Cát	Đá
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,63	2,72
Khối lượng thể tích	kg/m <sup>3</sup>	1490	1430
Mô đun độ lớn	-	1,9	-
D <sub>max</sub>	mm	-	13,37
D <sub>min</sub>	mm	-	5



Hình 1. Hệ nguyên vật liệu sử dụng để chế tạo HSC.

Bảng 3. Thông số kỹ thuật của sợi thép.

Chỉ tiêu kỹ thuật	Đơn vị	Sợi thép
Đường kính	mm	0,8
Chiều dài sợi	mm	60
Cường độ kéo đứt	MPa	1100
Mô đun đàn hồi	GPa	250

Ngoài ra, nước (N) được sử dụng để chế tạo bê tông là nguồn nước không có váng dầu, không màu, không mùi và không chứa tạp chất, thỏa yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 4506 : 2012 [21]. Bên cạnh

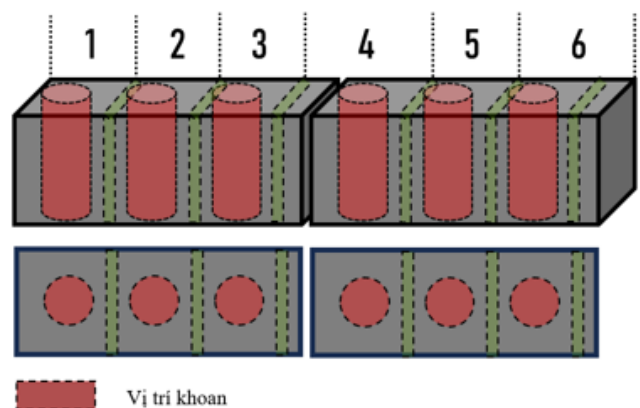
nước, phụ gia hóa học Sikamen R4 được sử dụng nhằm giảm lượng dùng nước nhưng vẫn đảm bảo tính công tác cho hỗn hợp bê tông, đồng thời làm tăng cường độ ban đầu và cường độ cuối cùng cho HSC.

## 2.2. Thiết kế cấp phối FAA

Dựa trên tiêu chuẩn thiết kế HSC theo TCVN 10306 : 2014 [22], kết hợp với thực nghiệm tại phòng thí nghiệm, thành phần cấp phối HSC đối chứng (HSC0) không sử dụng sợi thép được thiết kế với tỷ lệ nước/chất kết dính là 0,32 và hàm lượng SF được sử dụng thay thế xi măng Portland là 8 % theo khối lượng chất kết dính. Để khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép, tỷ lệ sợi thép thêm vào trong hỗn hợp bê tông lần lượt là 0,4 % và 0,6 % theo thể tích bê tông. Bảng 4 thể hiện ba cấp phối HSC được nghiên cứu trong bài báo này; trong đó: HSC0,4 và HSC0,6 lần lượt là cấp phối HSC sử dụng 0,4 % và 0,6 % sợi thép.

## 2.3. Quy trình chế tạo mẫu bê tông

Sau khi thiết kế cấp phối theo Bảng 4, hệ nguyên vật liệu được định lượng và được nhào trộn đồng nhất trong máy trộn tại công trường và sau đó, được đổ vào khuôn dầm thép với kích thước 150 × 150 × 600 mm. Sau 24 ± 4 h, các mẫu được tháo khuôn và được dưỡng hộ trong nước đến 28 ngày tuổi trước khi tiến hành khoan mẫu để khảo sát các đặc trưng cơ học của bê tông. Hình 2 thể hiện mô hình khoan lấy mẫu trong nghiên cứu này. Hình 3 cung cấp hình ảnh thực nghiệm về việc khoan lấy mẫu trước khi tiến hành thí nghiệm đặc trưng cơ học của HSC; cụ thể: nghiên cứu này tập trung ba cấp phối ở Bảng 4 và từ đó, đã đúc 12 mẫu dầm bê tông với kích thước 150 × 150 × 600 mm và sau đó, thu được 27 mẫu khoan hình trụ với  $d = 80$  mm và  $h = 150$  mm để thí nghiệm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson và cường độ chịu kéo khi bứt.



Hình 2. Mô hình khoan mẫu dầm với kích thước 150 × 150 × 600 mm.

**Bảng 4.** Cấp phối cho 1 m<sup>3</sup> bê tông.

Thành phần	Đơn vị : kg/m <sup>3</sup>						S (kg)
	XM	SF	N	C	Đ	PG	
HSC0	472	41	164	697	1090	7	0
HSC0,4	472	41	164	697	1090	7	10
HSC0,6	472	41	164	697	1090	7	15

XM: xi măng; SF: silica fume; N: nước; C: cát; Đ: đá; PG: phụ gia hóa học; S: sợi thép

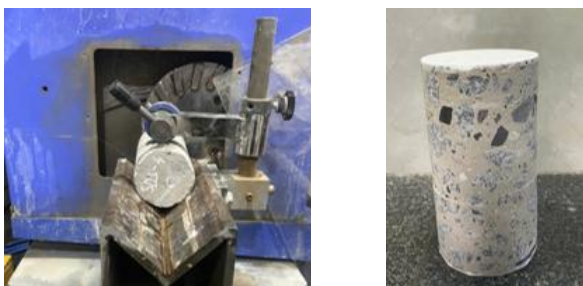


(a) Mẫu được khoan từ mẫu đầm (b) Các mẫu sau khi khoan

**Hình 3.** Quy trình chế tạo các mẫu bê tông.

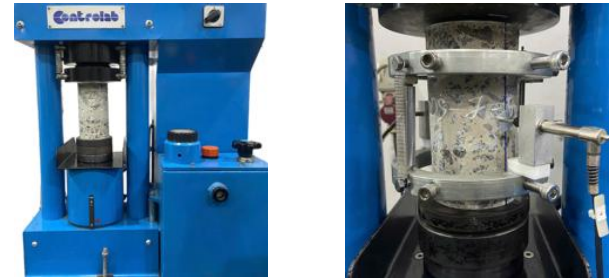
**2.4. Quy trình thí nghiệm**

Các đặc trưng cơ học của HSC được khảo sát trong nghiên cứu này bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson và cường độ chịu kéo khi bẻ. Mỗi chỉ tiêu tương ứng của mỗi cấp phối được xác định trên ba mẫu bê tông được khoan từ mẫu đầm bê tông với kích thước 150 × 150 × 600 mm theo Hình 2 và 3 và lấy giá trị trung bình. Đối với thí nghiệm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson, theo TCVN 3105 : 2022 [23], các mẫu bê tông với d = 80 mm và h = 150 mm được làm phẳng mặt bằng máy mài (Hình 4 (a) và (b)). Sau đó, các mẫu bê tông được định vị và đặt vào máy nén cùng với bộ khung hỗ trợ để đo chuyển vị của mẫu trong quá trình thí nghiệm xác định cường độ chịu nén theo TCVN 3118 : 2022 [24], mô đun đàn hồi và hệ số Poisson theo ASTM C469 [25] (Hình 5 (a) và (b)). Đối với thí nghiệm cường độ chịu kéo khi bẻ, các mẫu bê tông hình trụ với d = 80 mm và h = 150 mm được đặt vào mô hình ép bẻ (Hình 6 (a) và (b)) theo ASTM C496 [26].



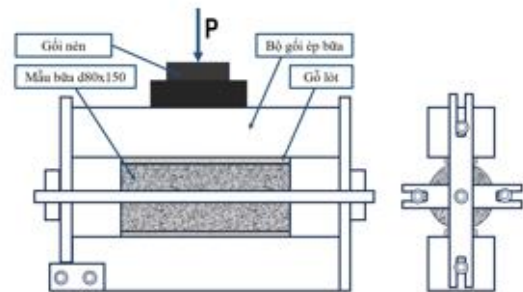
(a) Mẫu được mài phẳng mặt (b) Mẫu sau khi được mài phẳng

**Hình 4.** Quy trình làm phẳng mặt mẫu bê tông.



(a) Mẫu trong quá trình nén (b) Mẫu trong quá trình đo chuyển vị

**Hình 5.** Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của mẫu bê tông.



(a) Mô hình ép bẻ



(b) Mẫu trong quá trình ép bẻ

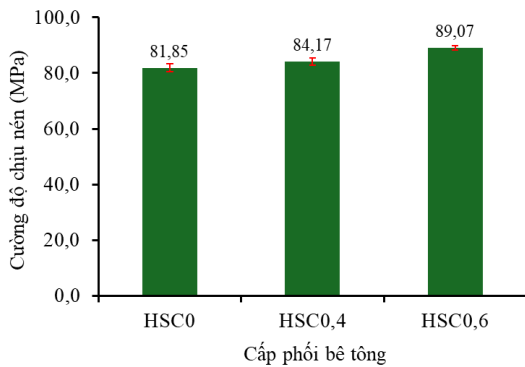
**Hình 6.** Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi bẻ của mẫu bê tông.

**3. Kết quả và thảo luận**

**3.1. Cường độ chịu nén**

Hình 7 thể hiện cường độ chịu nén của HSC chứa SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Nhìn chung, tất cả các cấp phối bê tông đều

có cường độ chịu nén trên 80 MPa, thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật về cường độ chịu nén của HSC. Khi so với mẫu bê tông đối chứng (HSC0) với cường độ chịu nén đạt 81,85 MPa, các mẫu HSC0,4 và HSC0,6 có cường độ chịu nén lần lượt đạt 84,17 MPa và 89,07 MPa, tức cao hơn 2,83 % và 8,82 %. Điều này chứng tỏ rằng việc sử dụng sợi thép đã cải thiện cường độ chịu nén của HSC. Xu hướng này cũng được quan sát trong các nghiên cứu trước [14,15,17]. Bên cạnh đó, việc sử dụng sợi thép ở mức 0,6 % cải thiện cường độ chịu nén của HSC hơn khi so với việc sử dụng sợi thép ở mức 0,4 %. Nguyên nhân cải thiện cường độ chịu nén là do sợi thép đóng vai trò gia cường, làm giảm sự phát triển vết nứt trong bê tông [10], dẫn đến cải thiện khả năng chịu nén của bê tông.



**Hình 7.** Cường độ chịu nén của HSC chứa SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

Hình 8 thể hiện hai mẫu bê tông HSC0 và HSC0,6 và nhận thấy rằng mẫu HSC0 bị phá hủy giòn với các vết nứt lớn và trải rộng ra toàn bộ mặt cắt mẫu (Hình 8 (a)); trong khi, mẫu HSC0,6 bị phá hủy dạng dẻo với các vết nứt nhỏ hơn và không lan rộng toàn bộ mặt cắt (Hình 8 (b)). Điều này chứng tỏ rằng việc bổ sung sợi thép vào trong bê tông góp phần làm giảm sự phá hủy giòn và đột ngột của HSC khi đạt đến giới hạn chịu nén cũng như hạn chế sự phát triển các vết nứt trong bê tông. Điều này cũng được nhận định trong nghiên cứu trước [10].



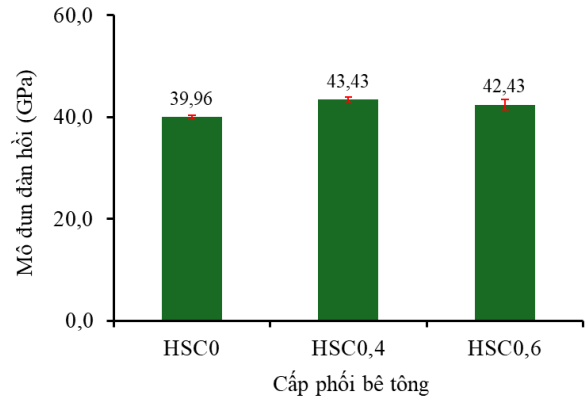
(a) HSC0 sau khi nén (b) HSC0,6 sau khi nén

**Hình 8.** Các mẫu bê tông sau khi đến giới hạn chịu nén.

### 3.2. Mô đun đàn hồi và hệ số Poisson

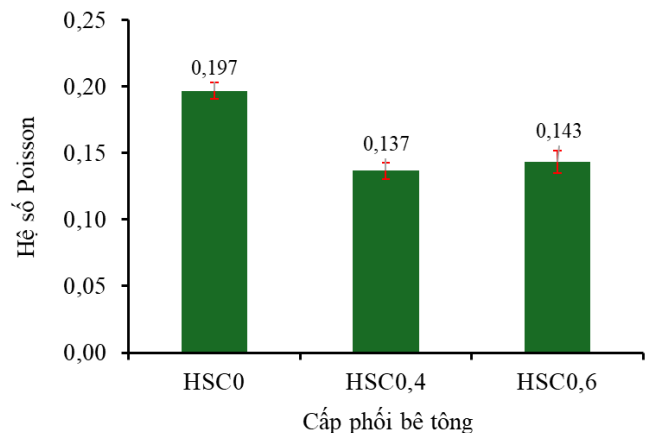
Hình 9 thể hiện mô đun đàn hồi của HSC chứa SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Mẫu bê tông đối chứng (HSC0) có mô đun đàn hồi

đạt giá trị 39,96 GPa; trong khi đó, các mẫu HSC0,4 và HSC0,6 có mô đun đàn hồi lần lượt đạt 43,43 GPa và 42,43 GPa, tức cao hơn lần lượt 8,68 % và 6,18 %. Điều này chứng tỏ rằng mẫu HSC0 có mô đun đàn hồi thấp nhất trong các cấp phối bê tông, phản ánh rằng mẫu HSC không sử dụng sợi thép có độ cứng thấp hơn so với các mẫu có chứa sợi thép. Tuy nhiên, mô đun đàn hồi của mẫu HSC0,4 và HSC0,6 xấp xỉ bằng nhau, chứng tỏ rằng việc sử dụng sợi thép ở mức 0,4 % và 0,6 % đã góp phần làm gia tăng nhẹ độ cứng cho HSC. Các nghiên cứu đi trước đã nhận thấy rằng việc bổ sung sợi thép không ảnh hưởng đáng kể đến mô đun đàn hồi của bê tông nhẹ [27,28].



**Hình 9.** Mô đun đàn hồi của HSC chứa SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

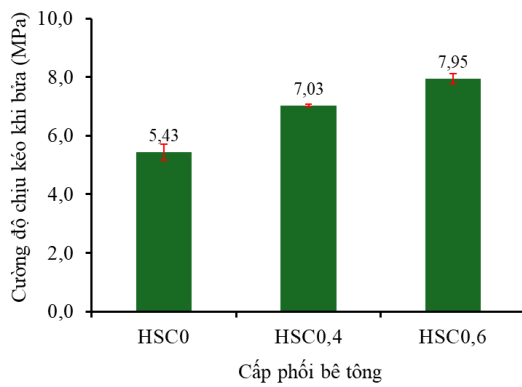
Hình 10 thể hiện hệ số Poisson của HSC chứa SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Mẫu bê tông đối chứng (HSC0) có hệ số Poisson đạt giá trị cao nhất và đạt 0,197; trong khi đó, các mẫu HSC0,4 và HSC0,6 có hệ số Poisson lần lượt đạt 0,137 và 0,143, tức thấp hơn 30,46 % và 27,41 %. Điều này chứng tỏ rằng khi có sợi thép, khả năng giãn nở ngang khi chịu nén của mẫu HSC có xu hướng giảm. Tuy nhiên, việc sử dụng sợi thép ở mức 0,4 % đã góp phần làm giảm khả năng giãn nở ngang khi chịu nén của HSC ở mức khoảng 4,38 % so với việc sử dụng sợi thép ở mức 0,6 %.



**Hình 10.** Hệ số Poisson của HSC chứa SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

### 3.3. Cường độ chịu kéo khi bừa

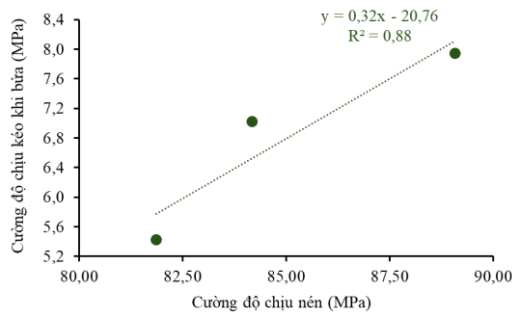
Hình 11 thể hiện cường độ chịu kéo khi bừa của HSC chứa SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Khi so với mẫu bê tông đối chứng (HSC0) với cường độ chịu kéo khi bừa đạt 5,43 MPa, các mẫu HSC0,4 và HSC0,6 có cường độ chịu kéo khi bừa lần lượt đạt 7,03 MPa và 7,95 MPa, tức cao hơn lần lượt 29,47 % và 46,40 %. Điều này chứng tỏ rằng việc sử dụng sợi thép đã cải thiện cường độ chịu kéo khi bừa của HSC. Xu hướng này cũng được quan sát trong nghiên cứu trước [17]. Bên cạnh đó, việc sử dụng sợi thép ở mức 0,6 % đã cải thiện đáng kể cường độ chịu kéo khi bừa của HSC khi so với việc sử dụng sợi thép ở mức 0,4 %. Điều này chứng tỏ việc sử dụng sợi thép ở mức 0,6 % đem lại hiệu quả tối ưu về mặt cường độ chịu kéo khi bừa của HSC chứa SF.



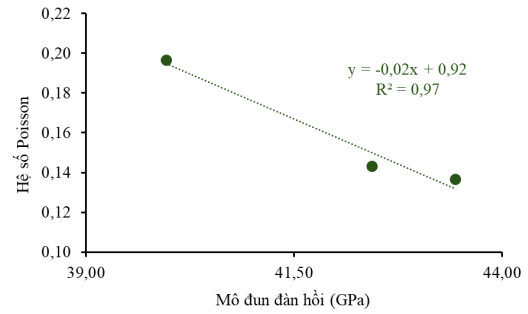
Hình 11. Cường độ chịu kéo khi bừa của HSC chứa SF với lượng sợi thép khác nhau.

### 3.4. Mối quan hệ giữa các đặc trưng cơ học

Hình 12 thể hiện mối tương quan thuận giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi bừa của các cấp phối bê tông với  $R^2$  cao (0,88), chứng tỏ rằng khi HSC có cường độ chịu nén cao sẽ có cường độ chịu kéo khi bừa cao và ngược lại. Tương tự, Hình 13 thể hiện mối tương quan giữa mô đun đàn hồi và hệ số Poisson của các cấp phối bê tông. Đây là mối tương quan nghịch với  $R^2$  rất cao (0,97), chứng tỏ rằng khi HSC có mô đun đàn hồi cao sẽ có hệ số Poisson thấp và ngược lại.



Hình 12. Mối tương quan giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi bừa.



Hình 13. Mối tương quan giữa mô đun đàn hồi và hệ số Poisson.

## 4. Kết luận

Dựa trên kết quả thực nghiệm đánh giá đặc trưng cơ học của HSC sử dụng 8% SF với hàm lượng sợi thép thấp ở mức 0,4 % và 0,6 % theo thể tích, một số kết luận chính bao gồm:

- Việc sử dụng sợi thép với hàm lượng thấp đã cải thiện đặc tính cơ học của HSC sử dụng SF, cụ thể: cường độ chịu nén cao hơn 2,83 – 8,82 %, mô đun đàn hồi cao hơn từ 6,18 – 8,68 %, hệ số Poisson thấp hơn 27,41 – 30,46 % và cường độ chịu kéo khi bừa cao hơn 29,47 – 46,40 %.

- Cường độ chịu nén có mối tương quan thuận với cường độ chịu kéo khi bừa của HSC. Trong khi đó, mô đun đàn hồi có mối tương quan nghịch với hệ số Poisson của HSC.

Nhìn chung, việc sử dụng sợi thép ở mức 0,6 % theo thể tích bê tông đem lại hiệu quả tối ưu trong việc cải thiện đặc tính cơ học của HSC sử dụng SF, với cường độ chịu nén cao đạt 89,07 MPa, mô đun đàn hồi cao đạt 42,43 GPa, hệ số Poisson đạt giá trị 0,143 và cường độ chịu kéo khi bừa đạt 7,95 MPa, có thể được sử dụng trong các công trình với yêu cầu về cường độ cao và khả năng chống nứt tốt, hay các công trình chịu tải trọng động. Khả năng ứng xử uốn và độ bền của HSC sử dụng SF với hàm lượng sợi thép thấp cần được triển khai nghiên cứu sâu hơn để đánh giá thêm hiệu quả của việc sử dụng sợi thép ở mức thấp trong HSC, từ đó mở rộng hơn việc ứng dụng của HSC chứa SF vào ngành công nghiệp xây dựng.

### Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. Tôi cũng xin cảm ơn sinh viên Lê Phước Thành đã hỗ trợ một phần thực nghiệm của nghiên cứu này.

### Tài liệu tham khảo

- [1]. FIP-CEB, “High strength concrete state of the art report Fib 197,” London, 1990.
- [2]. ACI Committee 363, “Report on high-strength concrete (ACI 363R-10),” 2010.
- [3]. R.A. Izadifard, A. Khalighi, M. Abdi Moghadam, H. Balouei Pirnaeimi, “A thoroughgoing study on engineering properties of high strength concrete at elevated temperatures,” *Fire Technology*, vol. 57, 1869–1900, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01093-2>.

- [4]. Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, C. Rongshen, "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 21, issue 3, 539–545, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001>.
- [5]. M. Ashraf, M.F. Iqbal, M. Rauf, M.U. Ashraf, A. Ulhaq, H. Muhammad, Q.F. Liu, "Developing a sustainable concrete incorporating bentonite clay and silica fume: Mechanical and durability performance," *Journal of Cleaner Production*, vol. 337, 130315, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130315>.
- [6]. K. Samimi, M. Zareechian, "Chemical resistance of synthesized graphene-modified cement paste containing natural pozzolans to acid attack," *Journal of Building Engineering*, vol. 60, 105174, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105174>.
- [7]. M. Amin, Y. Elsakhawy, K. Abuel-hassan, B.A. Abdelsalam, "Effects of pozzolanic treatment method of aggregate on recycled aggregate high strength concrete properties," *Journal of Building Engineering*, vol. 108, 112898, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112898>.
- [8]. A. Venkateshwaran, B. Lai, and J. Y. R. Liew, "Design of steel fiber-reinforced high-strength concrete-encased steel short columns and beams," *ACI Structural Journal*, vol. 118, no. 1, 45–59, 2021. 10.14359/51728077.
- [9]. K. Holschemacher, T. Mueller, Y. Ribakov, "Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete," *Materials and Design*, vol. 31, no. 5, 2604–2615, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>.
- [10]. A.M. Brandt, "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering," *Composite Structures*, vol. 86, issues 1–3, 3–9, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.
- [11]. R.F. Zollo, "Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development," *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, issue 2, 107–122, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)
- [12]. K. Hannawi, H. Bian, W. Prince-Agbodjan, B. Raghavan, "Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes," *Composites Part B: Engineering*, vol. 86, 214–220, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>.
- [13]. M.B. Eide, J.-M. Hisdal, "Ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC)–State of the art: FA 2 Competitive constructions: SP 2.2 Ductile high strength concrete," 8253612982, 2012.
- [14]. H.L. Ma, C. Cui, X. Li, S.L. Hu, "Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell-aggregate concrete," *Materials and Design*, vol. 52, 565–571, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.086>.
- [15]. C.D. Atiş, O. Karahan, "Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, 23, 392–399, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.002>.
- [16]. A. Khaloo, E. Molaei Raisi, P. Hosseini, H. Tahsiri, "Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers," *Construction and Building Materials*, 51, 179–186, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054>.
- [17]. S. Iqbal, A. Ali, K. Holschemacher, T.A. Bier, "Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC)," *Construction and Building Materials*, 98, 325–333, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.112>.
- [18]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 2682 : 2020 Xi măng Poóc Lăng - Yêu cầu kỹ thuật," 17 trang, 2020.
- [19]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 8827 : 2011 Phụ gia khoáng hoạt tính cao dung cho bê tông và vữa – silica fume và tro trấu nghiền mịn," 19 trang, 2011.
- [20]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 7570 : 2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật," 14 trang, 2006.
- [21]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 4506:2012 Nước cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật," 17 trang, 2012.
- [22]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 10306 : 2014 Bê tông cường độ cao – Thiết kế thành phần mẫu hình trụ," 29 trang, 2014.
- [23]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 3105 : 2022 Hỗn hợp bê tông và bê tông - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử," 20 trang, 2022.
- [24]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 3118 : 2022 Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén," 4 trang, 2022.
- [25]. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, "ASTM C469 Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression," 5 trang, 2017.
- [26]. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, "ASTM C496 Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens," 4 trang, 2017.
- [27]. H. Mazaheripour, S. Ghanbarpour, S.H. Mirmoradi, I. Hosseinpour, "The effect of polypropylene fibers of the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, 351–358, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018>.
- [28]. F. Altun, B. Aktas, "Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 38, 575–581, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.022>.