

Khả năng ứng xử uốn của bê tông cường độ cao chứa silica fume được gia cường bởi sợi thép với hàm lượng thấp

Nguyễn Ngọc Thành^{1,2*}

¹ Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh

² Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Bê tông cường độ cao
Độ mở rộng vết nứt
Độ võng
Silica fume
Sợi thép
Ứng suất giới hạn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung khảo sát khả năng ứng xử uốn của bê tông cường độ cao (HSC) chứa 8% silica fume (SF) kết hợp sử dụng sợi thép với hàm lượng 0%; 0,4% và 0,6% theo thể tích bê tông nhằm đánh giá việc cải thiện khả năng chịu uốn của HSC chứa SF khi được gia cường sợi thép ở mức thấp. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng đối với mẫu đầm HSC không sợi thép (CS0), ứng suất uốn giới hạn đạt 5,23 MPa; độ võng tại thời điểm phá hủy không đo được; mẫu CS0 có sự phá hủy đột ngột ngay sau khi đạt tải trọng giới hạn và bị gãy đôi. Đối với mẫu đầm HSC được gia cường 0,4% và 0,6% sợi thép (tương ứng CS04 và CS06), ứng suất uốn giới hạn lần lượt đạt 5,81 MPa và 6,28 MPa; tức tăng 10,99% và 20,07% so với mẫu CS0; độ võng tại thời điểm phá hủy đo được của mẫu CS04 và CS06 lần lượt đạt 2,04 mm và 2,15 mm. Khi so với mẫu CS04, mẫu CS06 đã có sự cải thiện về khả năng chịu uốn, với ứng suất uốn giới hạn tăng 8,18%; tuy nhiên, độ võng của mẫu CS06 cũng tăng 5,27%. Nhìn chung, việc sử dụng 0,4% và 0,6% sợi thép đã góp phần chứng minh hiệu quả của việc gia cường sợi thép ở mức thấp trong việc phân tán ứng suất, hạn chế sự phát triển của vết nứt và giúp HSC không bị phá hủy đột ngột như mẫu CS0. Tuy nhiên, sợi thép với hàm lượng 0,6% vẫn không thể giúp mẫu HSC hạn chế sự biến dạng khi gia tăng tải trọng và sự mở rộng lớn của vết nứt.

KEYWORDS

High-strength concrete
Crack mouth opening displacement
Displacement
Silica fume
Steel fiber
Ultimate stress

ABSTRACT

This study focuses on investigating flexural behavior of high-strength concrete (HSC) containing 8% silica fume (SF) combined with steel fiber at various contents corresponding to 0%, 0.4%, and 0.6% by volume of concrete to evaluate the improvement in flexural ability of HSC with SF reinforced by steel fiber with low contents. Experimental results showed that for the HSC specimens without steel fiber (CS0), the ultimate flexural stress reached 5.23 MPa; the displacement at failure was not measurable; the CS0 specimen showed abrupt immediately after reaching the limit load and broke in half. For HSC specimens reinforced with 0.4% and 0.6% steel fibers (CS04 and CS06, respectively), the ultimate flexural stresses reached 5.81 MPa and 6.28 MPa, respectively, implying an increase of 10.99% and 20.07% as compared to the CS0 specimen. The displacements at failure measured for the CS04 and CS06 specimens corresponded to 2.04 mm and 2.15 mm, respectively. When compared to the CS04 specimen, the CS06 specimen showed improved flexural strength, with the ultimate stress increased by 8.18%; however, the displacement at failure of the CS06 specimen increased by 5.27%. Consequently, the use of 0.4% and 0.6% steel fibers contributed to the effectiveness of low-content steel fiber reinforcement in stress dispersion, limiting crack growth, and preventing the HSC specimens as compared with the CS0 specimen. However, the use of steel fiber at 0.6% by volume of concrete was still insufficient to limit the displacement under the increased load and large crack expansion in the HSC specimen.

1. Giới thiệu

Sự phát triển kinh tế - xã hội ngày càng tăng cao, đã và đang thúc đẩy nhu cầu sử dụng bê tông, đặc biệt bê tông cường độ cao (HSC) vào các công trình dân dụng công nghiệp, công trình giao thông và cơ sở hạ tầng ngày càng đáng kể. Bê tông cường độ cao thường được chế tạo từ xi măng Portland, cốt liệu lớn, cốt liệu nhỏ, nước kết hợp với việc sử dụng phụ gia (bao gồm phụ gia hóa học và phụ gia khoáng vô cơ

hoạt tính) nhằm giảm lượng dùng xi măng và nước đồng thời nâng cao cường độ và kéo dài tuổi thọ cho bê tông [1]. Một trong những phụ gia khoáng vô cơ hoạt tính điển hình thường được sử dụng để chế tạo HSC là silica fume (SF) [2]. Silica fume là sản phẩm phụ siêu mịn từ ngành luyện kim silicon và ferrosilicon, chứa đáng kể hàm lượng SiO_2 hoạt tính cao tham gia vào phản ứng pozzolanic cùng với Ca(OH)_2 được tạo ra từ quá trình hydrat hóa của xi măng để tạo ra các sản phẩm hydrat hóa thứ cấp (tức gel C-S-H) có khả năng lấp đầy lỗ rỗng trong hệ nền,

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

Nhận ngày 05/05/2026, sửa xong ngày 26/05/2026, chấp nhận đăng ngày 27/05/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1377>

dẫn đến cải thiện cường độ và độ bền cho bê tông [3]. Việc sử dụng SF thay thế một phần xi măng Portland cũng góp phần vào việc giảm phát thải CO₂ từ quá trình sản xuất xi măng [4]. Chính vì thế, HSC chứa SF là một trong những giải pháp kỹ thuật bền vững được lựa chọn ứng dụng trong các kết cấu cao tầng với yêu cầu khả năng chịu lực lớn và mang lại hiệu quả về môi trường.

Mặc dù sở hữu các ưu điểm về cường độ cao, tuổi thọ lâu và thân thiện môi trường nhưng HSC lại có nhược điểm đặc trưng giòn, độ dẻo thấp, độ bền kéo thấp, rất dễ bị nứt và phá hủy đột ngột khi vượt quá tải trọng [5]. Để khắc phục hạn chế này, việc bổ sung sợi vào hệ nền HSC đã được đề xuất [5], [6]. Bê tông cường độ cao thường được gia cường bằng các loại sợi riêng biệt, ngẫu nhiên và phân bố ngẫu nhiên, góp phần cải thiện các đặc tính cơ học, độ dẻo và độ bền, đồng thời cung cấp các giải pháp với chi phí tương đối và thuận tiện hơn cho việc xây dựng và bảo trì các công trình bê tông [7]. Sợi thép thường được sử dụng trong sản xuất HSC nhằm giúp cải thiện độ bền chịu uốn và chịu kéo, tăng độ dẻo dai và khả năng chống nứt cho HSC [4], [5], [6], [7]. Song và Wang [6] đã gia cường sợi thép với hàm lượng 0,5 %; 1,0 %; 1,5 % và 2,0 % vào trong HSC chứa 1,5 % SF và nhận thấy rằng cường độ chịu nén của HSC tăng đến 15,3 % khi gia cường 1,5 % sợi thép và cường độ chịu kéo khi đứt cũng được gia tăng đến 98,3 % khi gia cường 2,0 % sợi thép. Köksal và cộng sự [8] cũng đã nghiên cứu cường độ chịu nén của HSC được gia cường bởi sợi thép (với tỷ lệ chiều dài/đường kính là 65 và 80, và hàm lượng sử dụng là 0,5 % và 1,0 % theo thể tích) kết hợp với việc sử dụng SF thay thế xi măng Portland lần lượt 0 %, 5 %, 10 % và 15 % theo khối lượng. Kết quả thực nghiệm đã cho thấy rằng (i) khi tăng hàm lượng SF ở mức 5 %, 10 % và 15 %, cường độ chịu nén của HSC không có sợi thép tăng đáng kể, lần lượt là 12,0 %, 73,4 % và 85,5 %; (ii) cường độ chịu nén của HSC chứa SF được gia cường bởi sợi thép cao hơn so với HSC chỉ chứa SF và không được gia cường sợi; (iii) cường độ chịu kéo khi uốn của HSC chứa 1,0 % sợi thép cao hơn so với HSC chứa 0,5 % sợi thép. Tương tự, Kabashi và cộng sự [9] cũng đã khám phá rằng việc thêm sợi thép từ 0,5 % đến 1,0 % đã làm gia tăng cường độ chịu kéo khi uốn khoảng 9,6 %. Abbass và cộng sự [10] đã nhận ra rằng việc sử dụng sợi thép có đường kính 0,62 mm và 0,75 mm với hàm lượng sử dụng trong bê tông lần lượt 0,5 %; 1,0 % và 1,5 % đã cải thiện đáng kể đặc tính cơ học của bê tông, cụ thể: cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn tăng lần lượt 10–25 % và 124 %. Amudhavalli và cộng sự [11] đã báo cáo rằng sự gia tăng cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông với SF thay thế xi măng ở mức 5 %, 10 %, 15 % và 20 % lần lượt là 21 %, 54 %, 61 % và 56 %. Trong khi, Siddique [3] nhận thấy rằng khi SF thay thế xi măng ở mức 5 %, 10 % và 15 %, sự gia tăng cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông lần lượt là 7 %, 42 % và 65 %. Nguyễn [12] cũng đã tiến hành khảo sát ảnh hưởng của việc sử dụng sợi thép ở mức thấp đến đặc tính cơ học của HSC sử dụng SF và nhận thấy rằng việc sử dụng sợi thép ở mức 0,6 % theo thể tích đã góp phần đem lại hiệu quả tối ưu trong việc nâng cao đặc tính cơ học của HSC sử dụng 8 % SF và khuyến nghị ứng dụng loại HSC này 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. Nhìn chung, mặc dù có

rất nhiều nghiên cứu về HSC được gia cường bởi sợi thép nhưng ảnh hưởng của sợi thép đến đặc trưng kỹ thuật của HSC vẫn chưa thống nhất do tác động đáng kể bởi hàm lượng sợi, cường độ của hệ nền bê tông, ... Song song đó, các nghiên cứu chuyên sâu về ứng suất giới hạn, ứng suất dư, độ mở rộng vết nứt, chỉ số dẻo dai, mối quan hệ giữa ứng suất uốn và độ mở rộng vết nứt hay mối quan hệ giữa độ võng và độ mở rộng vết nứt ... của HSC chứa SF được gia cường bởi sợi thép ở hàm lượng thấp vẫn còn hạn chế.

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này chủ yếu tập trung khảo sát khả năng ứng xử uốn của HSC chứa 8 % SF kết hợp sử dụng sợi thép với hàm lượng 0 %; 0,4 % và 0,6 % theo thể tích bê tông nhằm đánh giá việc cải thiện khả năng chịu uốn của HSC chứa SF khi được gia cường sợi thép ở mức thấp. Nghiên cứu này góp phần cung cấp cơ sở dữ liệu tin cậy về hiệu quả sử dụng sợi thép với hàm lượng tối ưu trong việc chế tạo HSC chứa SF. Kết quả hướng tới ứng dụng cho các kết cấu chịu tải trọng uốn, cường độ cao như dầm, bản mặt cầu, đồng thời đảm bảo khả năng chống nứt và hiệu quả kinh tế.

2. Thực nghiệm

2.1. Mẫu và loại bê tông

2.1.1. Hệ nguyên vật liệu

Xi măng và SF được sử dụng làm chất kết dính trong nghiên cứu này. Xi măng được sử dụng là XM Portland PC40 có khối lượng riêng 2,9 g/cm³ và các chỉ tiêu kỹ thuật thỏa mãn theo TCVN 2682 : 2020 [13]. Silica fume trong nghiên cứu này là SF chứa trên 95 % SiO₂ ở dạng vô định hình, kích thước hạt trung bình chỉ khoảng 0,1 µm, có khối lượng riêng 2,2 g/cm³ và chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày tuổi 98,2 %, thỏa theo TCVN 8827 : 2011 [14]. Trong khi đó, cốt liệu sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm cát sông có mô đun độ lớn 1,9 và đá dăm có D_{max} = 13,37 mm và D_{min} = 5 mm, phù hợp theo TCVN 7570 : 2006 [15]. Khối lượng riêng của cát sông và đá dăm lần lượt là 2,63 g/cm³ và 2,72 g/cm³; trong khi, khối lượng thể tích xếp của cát sông và đá dăm lần lượt là 1490 kg/m³ và 1430 kg/m³. Bên cạnh đó, nước thỏa yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 4506 : 2012 [16] và phụ gia hóa học Sikamen R4 được sử dụng để chế tạo bê tông tươi nhằm đảm bảo tính công tác theo thiết kế và giúp cải thiện cường độ cho HSC. Sợi thép SDS-08060 với đường kính d = 0,8 mm và chiều dài l = 60 mm, cường độ chịu kéo đứt đạt 1100 MPa và mô đun đàn hồi với giá trị 250 GPa được lựa chọn sử dụng.

2.1.2. Thành phần cấp phối

Dựa trên nghiên cứu trước của Nguyễn [12], ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau (0; 0,4 % và 0,6 % theo thể tích bê tông) được tiếp tục lựa chọn để khảo sát khả năng ứng xử uốn của HSC trong nghiên cứu này. Bảng 1 thể hiện thành phần cấp phối của ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

Bảng 1. Thành phần cấp phối của ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

Thành phần	Đơn vị	CS0	CS04	CS06
Cát sông	kg/m ³	697	697	697
Đá dăm	kg/m ³	1090	1090	1090
Nước	kg/m ³	164	164	164
Xi măng Portland	kg/m ³	472	472	472
Silica fume	kg/m ³	41	41	41
Phụ gia hóa học Sikamen R4	kg/m ³	7	7	7
% sợi thép	% theo thể tích	0	0,4	0,6

2.1.3. Quy trình chế tạo và dưỡng hộ mẫu

Dựa trên tỷ lệ thành phần nguyên vật liệu của ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau ở Bảng 1, bốn mẫu dầm bê tông với kích thước 150×150×600 mm (Hình 1) của từng cấp phối được chế tạo tại công trường và được dưỡng hộ trong nước đến 28 ngày tuổi trước khi khảo sát khả năng ứng xử uốn của dầm.



Hình 1. Các mẫu dầm bê tông với kích thước 150×150×600 mm được chế tạo tại công trường.

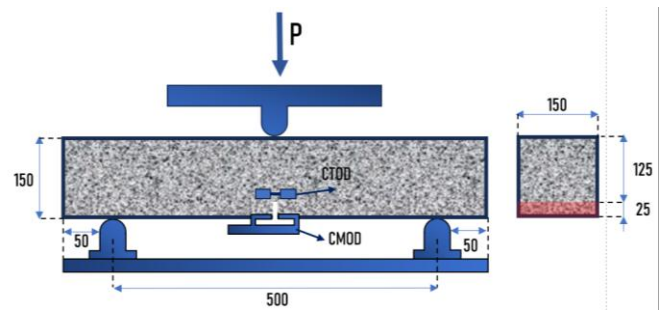
2.2. Đặc trưng kỹ thuật của bê tông

Bảng 2. Đặc trưng kỹ thuật của ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau dựa trên kết quả thực nghiệm của Nguyễn [12].

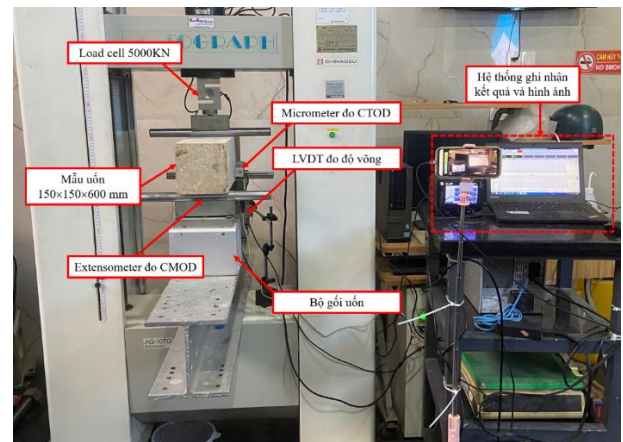
Đặc trưng kỹ thuật	Đơn vị	CS0	CS04	CS06
Cường độ chịu nén	MPa	81,85	84,17	89,07
Mô đun đàn hồi	GPa	39,96	43,43	42,43
Hệ số Poisson		0,197	0,137	0,143
Cường độ chịu kéo khi bừa	MPa	5,43	7,03	7,95

Trước khi khảo sát khả năng ứng xử uốn của các mẫu dầm bê tông, đặc trưng kỹ thuật của ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau được khảo sát, bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson và cường độ chịu kéo khi bừa. Bảng 2 liệt kê đặc trưng kỹ thuật của ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Nhìn chung, việc sử dụng sợi thép có ảnh hưởng đáng kể đến các đặc trưng kỹ thuật của ba loại mẫu HSC chứa 8 % SF và đã được trình bày trong nghiên cứu trước của Nguyễn [12].

2.3. Quy trình thí nghiệm khả năng ứng xử uốn của mẫu dầm bê tông



Hình 2. Mô hình uốn mẫu dầm dựa trên tiêu chuẩn EN 14651 : 2005 [17] theo phương pháp uốn ba điểm [18].



Hình 3. Thí nghiệm uốn ba điểm trên mẫu dầm bê tông cốt sợi thép tại phòng thí nghiệm [18].

Nghiên cứu này thực hiện thí nghiệm uốn ba điểm cho các mẫu dầm bê tông cốt sợi thép. Để khảo sát khả năng ứng xử uốn của các mẫu dầm bê tông, quy trình thí nghiệm được thực hiện theo các bước sau: (i) tạo phẳng bề mặt bê tông tại các vị trí tiếp xúc với gối uốn của mẫu dầm thông qua công tác mài nhằm tạo độ chính xác cho thiết bị Micrometer; (ii) cắt tạo rãnh ở giữa nhịp dầm có độ sâu 25 mm và bề rộng 5±1 mm để dễ dàng quan sát và ghi nhận giá trị mở rộng vết nứt (CMOD) và độ rộng vết nứt (CTOD) theo EN 14651 : 2005 [17]; (iii) lắp đặt các thiết bị đo chuyển vị bao gồm extensometer để đo CMOD, micrometer điện tử để đo CTOD và cảm biến vị trí LVDT để đo độ võng của mẫu dầm; (iv) tiến hành uốn dầm theo mô hình uốn ba điểm (Hình 2) dựa trên tiêu chuẩn EN 14651 : 2005 [17] để xác định các thông số kỹ thuật bao gồm lực gây phá hoại mẫu dầm, ứng suất giới hạn, ứng suất uốn dư, CMOD và CTOD theo sự gia tăng của ứng suất uốn và độ võng của mẫu dầm bê tông khi chịu uốn. Hình 3 thể hiện mô hình uốn thực tế tại phòng thí nghiệm với các thông số kỹ thuật như lực gây phá hoại mẫu dầm, ứng suất giới hạn, ứng suất uốn dư, CMOD và độ võng được ghi nhận tự động bằng hệ thống máy tính. Do hạn chế tính năng của thiết bị micrometer nên kết quả đo độ rộng vết nứt được ghi nhận thủ công. Lưu ý rằng đối với các mẫu thuộc nhóm CS0, do các mẫu này không có sợi nên dự đoán rằng khi chịu tải trọng tối đa, các mẫu bị phá

hủy đột ngột và gãy đôi; do đó, để đảm bảo an toàn cho các thiết bị đo nên nghiên cứu này không lắp đặt LVDT để đo độ võng cho các mẫu thuộc nhóm CS0.

Dựa trên tiêu chuẩn EN 14651 : 2005 [17], nghiên cứu này xác định ứng suất giới hạn là giá trị ứng suất của mẫu dầm bê tông cốt sợi thép không còn tuân theo định luật Hooke và được đề xuất là giá trị ứng suất lớn nhất trong khoảng $CMOD \leq 0,05$ mm. Giá trị ứng suất giới hạn ($f_{ct,L}^f$) được xác định theo công thức (1).

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

trong đó: $f_{ct,L}^f$: ứng suất giới hạn, đơn vị N/mm² hay MPa; F_L là giá trị lực tương ứng với giới hạn tỉ lệ trong khoảng $CMOD \leq 0,05$ mm theo tiêu chuẩn EN 14651 : 2005 [17], đơn vị N; b là bề rộng của mặt cắt ngang của dầm, đơn vị mm; h_{sp} là chiều cao mặt cắt ngang tính từ rãnh vết khía, đơn vị mm.

Trong khi đó, ứng suất uốn dư (f_j) là giá trị lực tác dụng tương ứng với giá trị của CMOD và được xác định theo công thức (2).

$$f_j = \frac{3F_j}{2bh_{sp}^2} \quad (2)$$

trong đó: F_j ($j = 1, 2, 3, 4$) là giá trị lực tác dụng tương ứng với giá trị của $CMOD_j = 0,5; 1,5; 2,5$ và $3,5$ mm theo tiêu chuẩn EN 14651 : 2005 [17], đơn vị N; b là bề rộng của mặt cắt ngang của dầm, đơn vị mm; h_{sp} là chiều cao mặt cắt ngang tính từ rãnh vết khía, đơn vị mm.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Thông số kỹ thuật của mẫu dầm khi chịu uốn

Bảng 3 tóm lược các kết quả thực nghiệm về thông số kỹ thuật của mẫu dầm tương ứng ba loại HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Lưu ý rằng các thông số kỹ thuật ở Bảng 3 được xác định là giá trị trung bình của bốn mẫu dầm tương ứng từng loại HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Bên cạnh đó, các con số giá trị trong dấu ngoặc tròn trong Bảng 3 là giá trị độ lệch chuẩn tương ứng từng thông số kỹ thuật.

Bảng 3. Thông số kỹ thuật của mẫu dầm tương ứng ba loại HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

Thông số kỹ thuật	Đơn vị	CS0	CS04	CS06
Khoảng cách 2 gối uốn	mm	500	500	500
Lực gây phá hoại (F_{max})	kN	16,37 (0,79)	18,15 (1,02)	19,63 (0,30)
Ứng suất giới hạn ($f_{ct,L}^f$)	MPa	5,23 (0,26)	5,81 (0,33)	6,28 (0,10)
Ứng suất dư				
f_1 tương ứng $CMOD = 0,5$ mm	MPa	-	3,76 (0,35)	4,31 (0,52)
f_2 tương ứng $CMOD = 1,5$ mm	MPa	-	1,44 (0,34)	1,51 (0,53)
f_3 tương ứng $CMOD = 2,5$ mm	MPa	-	0,73 (0,11)	0,75 (0,25)
f_4 tương ứng $CMOD = 3,5$ mm	MPa	-	0,41 (0,14)	0,52 (0,18)
Độ võng (Δ_{max})	mm	-	2,04 (0,26)	2,15 (0,30)

Dựa trên kết quả Bảng 3 và quan sát thực nghiệm, nhận thấy rằng mẫu dầm CS0 không chứa sợi khi chịu uốn đã tuân theo đặc trưng giòn của bê tông, tức khi lực uốn đạt giá trị lớn nhất và xuất hiện vết nứt đầu tiên, mẫu dầm bị phá hủy đột ngột và gãy đôi hoàn toàn (Hình 4a). Trong khi đó, nhóm mẫu dầm CS04 và CS06 có chứa sợi thép bị phá hủy nhưng không bị gãy đôi (Hình 4b).

Từ Bảng 3, giá trị lực gây phá hoại (F_{max}) của các nhóm mẫu dầm CS04 và CS06 có chứa sợi lần lượt đạt 18,15 MPa và 19,63 MPa, tức cao hơn tương ứng 10,89 % và 19,95 % so với mẫu dầm CS0 (với giá trị lực gây phá hoại đạt 16,37 MPa). Tương tự, ứng suất giới hạn ($f_{ct,L}^f$) của các nhóm mẫu dầm CS04 và CS06 có chứa sợi đạt 5,81 MPa và 6,28 MPa, tức cao hơn tương ứng 10,99 % và 20,07 % so với mẫu dầm CS0 (với ứng suất giới hạn đạt 5,23 MPa). Các kết quả này chứng tỏ hiệu quả của việc bổ sung sợi thép đã cải thiện khả năng chịu uốn của mẫu dầm bê tông và khi hàm lượng sợi thép càng cao, việc cải thiện này càng được nâng cao. Xu hướng cải thiện khả năng chịu uốn do việc gia cường sợi trong bê tông cũng được báo cáo trong các nghiên cứu đi trước [19], [20]. Điều này có thể được giải thích là do hiệu quả cầu nối các vết nứt từ các sợi thép đã cải thiện khả năng chịu uốn cho mẫu dầm

[19], dẫn đến không bị phá hủy đột ngột và gãy đôi hoàn toàn như mẫu dầm CS0 (Hình 4a).



(a)



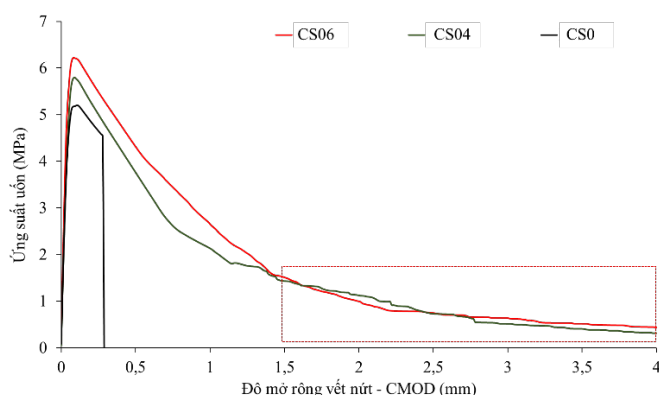
(b)

Hình 4. (a) mẫu dầm CS0 và (b) mẫu dầm CS06 sau khi uốn ba điểm.

Bên cạnh đó, mẫu đầm CS0 chỉ duy trì được khả năng chịu uốn trong CMOD tăng từ 0 tới 0,3 mm; do đó, các ứng suất dư không xác định được. Trong khi đó, mẫu đầm CS04 có thể duy trì được khả năng chịu lực khi vết nứt xuất hiện và CMOD nhỏ hơn 2,5 mm; tuy nhiên, khi CMOD lớn hơn 3,5 mm, khả năng chịu lực của mẫu đầm CS04 gần bằng 0 nhưng mẫu không bị gãy đôi. Xu hướng này cũng được quan sát trong mẫu đầm CS06.

3.2. Mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và ứng suất uốn của mẫu đầm bê tông có và không có gia cường sợi thép

Hình 5 thể hiện mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và ứng suất uốn của mẫu đầm tương ứng ba loại HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau. Hình 5 rõ ràng chứng tỏ rằng mẫu đầm CS0 đã bị phá hủy ngay khi vượt ứng suất giới hạn ($f_{ct,L}^f = 5,23$ MPa) tương ứng với CMOD xấp xỉ 0,3 mm, đồng thời không có dữ liệu về ứng suất dư vì không có gia cường sợi thép trong bê tông – đây là khả năng ứng xử uốn điển hình của bê tông không gia cường, tức không có khả năng duy trì khả năng chịu lực sau khi nứt và bị gãy đôi (Hình 4a).



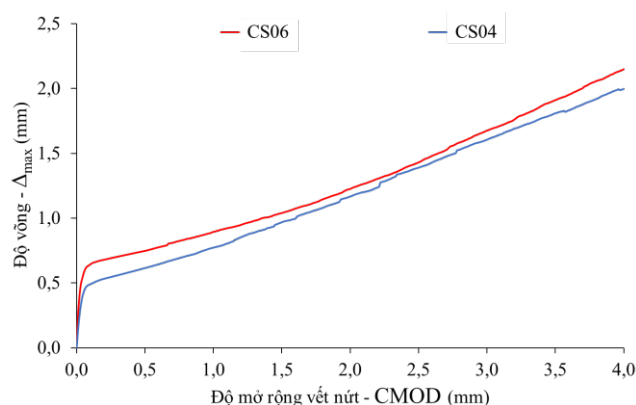
Hình 5. Mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và ứng suất uốn của mẫu đầm tương ứng ba loại HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

Trong khi đó, mẫu đầm CS04 và CS06 có ứng suất giới hạn cao hơn và không bị gãy đôi như mẫu đầm CS0 – điều này đã được trình bày ở Bảng 3 trong mục 3.1. Trái ngược với mẫu đầm CS0 không có giá trị ứng suất dư, nhóm mẫu đầm CS04 và CS06 có xuất hiện các ứng suất dư tương ứng $CMOD_i = 0,5; 1,5; 2,5$ và $3,5$ mm theo tiêu chuẩn EN 14651 : 2005 [17]. Dựa trên Bảng 1 và Hình 5, quan sát thấy rằng ứng suất dư f_1 của mẫu đầm CS04 và CS06 tương ứng $CMOD_i = 0,5$ mm lần lượt đạt giá trị 3,76 MPa và 4,31 MPa, chứng tỏ rằng sợi thép bắt đầu “gánh lực” ngay sau khi mẫu đầm bê tông nứt và giúp mẫu giữ được tải trọng và đạt giá trị cao hơn 14,70 % khi gia cường 0,6 % sợi so với gia cường 0,4 % sợi. Ứng suất dư f_2 của mẫu đầm CS04 và CS06 tương ứng $CMOD_i = 1,5$ mm lần lượt đạt giá trị 1,44 MPa và 1,51 MPa, chứng tỏ rằng khả năng chịu lực giảm dần khi độ mở rộng vết nứt tăng, không phụ thuộc vào hàm lượng sợi thép. Ứng suất dư f_3 của mẫu đầm CS04

và CS06 tương ứng $CMOD_i = 2,5$ mm lần lượt đạt giá trị 0,73 MPa và 0,75 MPa, chứng tỏ rằng khả năng chịu lực tiếp tục giảm nhưng mẫu vẫn duy trì một phần khả năng chịu tải nhờ sợi thép nhưng không phụ thuộc vào hàm lượng sợi thép. Ứng suất dư f_4 của mẫu đầm CS04 và CS06 tương ứng $CMOD_i = 3,5$ mm lần lượt đạt giá trị 0,41 MPa và 0,52 MPa, cho thấy sự suy giảm ứng suất ở độ mở rộng vết nứt lớn nhất và không phụ thuộc vào hàm lượng sợi thép. Điều này chứng tỏ rằng việc gia cường 0,6 % sợi thép chỉ hiệu quả cải thiện ứng suất giới hạn và ứng suất dư f_1 tương ứng $CMOD_i = 0,5$ mm khi so với việc gia cường 0,4 % sợi thép; trong khi, ứng suất dư f_2, f_3 và f_4 tương ứng $CMOD_i = 1,5; 2,5$ và $3,5$ mm xấp xỉ như nhau ở cả hai hàm lượng sợi thép gia cường trong mẫu đầm bê tông.

3.3. Mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và độ võng của mẫu đầm bê tông có gia cường sợi thép

Hình 6 thể hiện mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và độ võng của mẫu đầm tương ứng hai loại HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.



Hình 6. Mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và độ võng của mẫu đầm tương ứng hai loại HSC chứa 8 % SF với hàm lượng sợi thép khác nhau.

Dựa trên kết quả thực nghiệm ở Hình 6, quan sát thấy rằng trong giai đoạn ban đầu, tức khi CMOD nằm trong khoảng từ 0 mm đến 0,5 mm, cả hai mẫu đầm CS04 và CS06 đều có giá trị độ võng tăng nhanh và giá trị độ võng của mẫu đầm CS06 cao hơn so với mẫu đầm CS04, chứng tỏ rằng sợi thép với hàm lượng cao hơn (tức 0,6 % theo thể tích bê tông) đã góp phần ngăn cản sự hình thành và mở rộng vết nứt ban đầu. Trong giai đoạn ổn định, tức khi CMOD nằm trong khoảng từ 0,5 mm đến 2,5 mm, quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt và độ võng gần như tuyến tính và biểu thị khả năng ứng xử đàn hồi dẻo của cả hai mẫu đầm CS04 và CS06, không phụ thuộc vào hàm lượng sợi thép. Tuy nhiên, độ dốc của mối quan hệ này trong mẫu đầm CS06 cao hơn so với mẫu đầm CS04, chứng tỏ rằng mẫu đầm CS06 có khả năng chịu tải cao hơn với độ võng lớn hơn trước khi bước vào giai đoạn phá hủy. Trong giai đoạn cuối, tức khi CMOD tăng trên 2,5 mm,

cả hai mẫu đầm CS04 và CS06 đều có xu hướng tiếp tục tăng độ võng, nhưng mẫu CS06 vẫn có giá trị độ võng cao. Điều này cho thấy rằng hàm lượng sợi thép cao hơn trong mẫu đầm CS06 đã giúp duy trì khả năng chịu lực khi vết nứt mở rộng, giảm nguy cơ gãy giòn so với mẫu đầm CS04. Tuy nhiên, về giá trị độ võng (Δ_{max}), quan sát từ Bảng 3 và Hình 6, mẫu đầm CS06 có độ võng đạt 2,15 mm, tức cao hơn 5,27 % so với mẫu đầm CS04 với giá trị độ võng đạt 2,04 mm. Điều này chứng tỏ rằng mặc dù hàm lượng sợi thép cao có thể cải thiện khả năng chịu uốn cho đầm do mật độ sợi thép dày đặc hơn, giúp phân tán ứng suất hiệu quả hơn, ngăn cản sự phát triển vết nứt, nhưng với sự gia tăng lực và sự mở rộng lớn của vết nứt thì việc gia cường 0,6 % sợi thép vẫn không thể giúp mẫu đầm bê tông tránh khỏi sự biến dạng.

Nhìn chung, việc gia cường 0,4 % và 0,6 % sợi thép đã giúp cải thiện khả năng chịu lực, làm giảm tốc độ phát triển vết nứt và độ võng hay độ biến dạng của mẫu HSC trong quá trình chịu tải trọng uốn. Kết quả này tương đồng với các nghiên cứu liên quan về các loại bê tông khác được gia cường bởi nhiều loại sợi khác [21], [22], [23].

4. Kết luận

Dựa trên kết quả thí nghiệm uốn ba điểm trên các mẫu đầm bê tông chứa 8 % SF kết hợp với việc gia cường sợi thép ở mức 0 %; 0,4 % và 0,6 % theo thể tích nhằm khảo sát khả năng ứng xử uốn của HSC sử dụng SF với hàm lượng sợi thép thấp, một số kết luận chính được đúc kết như sau:

- Đối với mẫu HSC không có sợi thép (CS0), khả năng chịu uốn và tính dẻo dai đạt giá trị thấp nhất, với ứng suất uốn giới hạn chỉ đạt 5,23 MPa trước khi mẫu bị phá hủy hoàn toàn. Độ võng tại thời điểm phá hủy không đo được và mối quan hệ giữa độ mở rộng vết nứt (CMOD) và ứng suất uốn cho thấy sự giảm tải đột ngột sau khi đạt ứng suất tối đa. Điều này là do bê tông không được gia cường sợi nên có đặc tính giòn, dẫn đến phá hủy đột ngột ngay sau khi đạt tải trọng giới hạn.

- Đối với mẫu HSC được gia cường 0,4 % và 0,6 % sợi thép (CS04 và CS06), khả năng chịu uốn và tính dẻo dai được cải thiện đáng kể với ứng suất uốn giới hạn đạt 5,81 MPa và 6,28 MPa, tức tăng 10,99 % và 20,07 % so với mẫu CS0. Độ võng tại thời điểm phá hủy đo được của hai mẫu đầm CS04 và CS06 đạt 2,04 mm và 2,15 mm. Mối quan hệ giữa CMOD và ứng suất uốn cho thấy sự giảm tải dần dần và không bị phá hủy đột ngột như mẫu CS0. Điều này cho thấy hiệu quả của việc gia cường 0,4 % và 0,6 % sợi thép trong việc phân tán ứng suất, hạn chế sự phát triển của vết nứt, cải thiện tính dẻo dai, giúp mẫu duy trì tải trọng ngay cả sau khi xuất hiện vết nứt và không bị phá hủy đột ngột như mẫu CS0.

- Khi so với mẫu HSC được gia cường 0,4 % sợi thép (CS04), mẫu HSC được gia cường 0,6 % sợi thép (CS06) đã cải thiện khả năng chịu uốn, với ứng suất giới hạn tăng 8,18 %; tuy nhiên, biến dạng của mẫu đầm tăng 5,27 %. Điều này chứng tỏ rằng việc gia cường sợi thép ở mức 0,6 % theo thể tích có thể xảy ra hiện tượng biến dạng, tức với sự gia tăng lực và sự mở rộng lớn của vết nứt, sợi thép với hàm lượng

0,6 % theo thể tích vẫn không thể giúp đầm bê tông tránh khỏi sự biến dạng. Do đó, cần có thêm các nghiên cứu chuyên sâu hơn để xác định ngưỡng tối ưu của hàm lượng sợi thép trong đầm HSC chứa SF và từ đó mở rộng hơn việc ứng dụng của HSC sử dụng SF vào ngành công nghiệp bê tông, hướng đến sự phát triển bền vững cho ngành công nghiệp xây dựng.

Tài liệu tham khảo

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. H. Moussa, A. B. Elabeidy, and T. Akçaoğlu, "Predicting the compressive strength of rubberized concrete containing silica fume using stacking ensemble learning model," *Constr. Build. Mater.*, vol. 449, p. 138254, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138254>.
- [2]. Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, and C. Rongshen, "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 3, pp. 539–545, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001>.
- [3]. R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 11, pp. 923–932, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>.
- [4]. M. S. Fattouh, B. A. Tayeh, I. S. Agwa, and E. K. Elsayed, "Improvement in the flexural behaviour of road pavement slab concrete containing steel fibre and silica fume," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, p. e01720, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01720>.
- [5]. O. Algassem, Y. Li, and H. Aoude, "Ability of steel fibers to enhance the shear and flexural behavior of high-strength concrete beams subjected to blast loads," *Eng. Struct.*, vol. 199, p. 109611, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109611>.
- [6]. P. S. Song and S. Hwang, "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, no. 9, pp. 669–673, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>.
- [7]. X. Shi, P. Park, Y. Rew, K. Huang, and C. Sim, "Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension," *Constr. Build. Mater.*, vol. 233, p. 117316, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117316>.
- [8]. F. Köksal, F. Altun, İ. Yiğit, and Y. Şahin, "Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 1874–1880, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.017>.
- [9]. N. Kabashi, "Effect of fibre reinforced concrete and behaviour in rigid pavement," *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 29–33, 2018, doi: <https://doi.org/10.18178/ijscer.7.1.29-33>.
- [10]. W. Abbass, M. I. Khan, and S. Mourad, "Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 168, pp. 556–569, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164>.
- [11]. N. K. Amudhavalli and J. Mathew, "Effect of silica fume on strength and durability parameters of concrete," *Int. J. Eng. Sci. Emerg. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 28–35, 2012.
- [12]. N. T. Nguyễn, "Đặc trưng cơ học của bê tông cường độ cao chứa silica fume

Ảnh hưởng của canxi nitrat tới một số tính chất của xi măng poóc lăng hỗn hợp

[13]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 2682 : 2020 Xi măng Poóc lăng,” 2020.
[14]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 8927 : 2011 Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - Silicafume và tro trấu nghiền mịn,” 2011.
[15]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 7570 : 2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa

TÓM TẮT
Yêu cầu kỹ thuật,” 2006.
Canxi nitrat
Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng canxi nitrat (CN) đến một số tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Hàm lượng CN được khảo sát bao gồm 0%, 0,1%, 0,2%, 0,3% và 0,4%. Các tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp được nghiên cứu bao gồm lượng nước tiêu chuẩn, nhiệt thủy hóa trong 24 giờ đầu, thời gian đông kết, và cường độ nén ở các tuổi 1 và 7 ngày. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc tăng hàm lượng CN từ 0% đến 0,4% không ảnh hưởng đáng kể tới lượng nước tiêu chuẩn. Kết quả phân tán,” Trường Đại học Bách khoa, HCM, 2024 cho thấy CN thúc đẩy đáng kể quá trình thủy hóa của xi măng ở tuổi sớm, làm tăng nhiệt độ của xi măng so với mẫu đối chứng. CN làm giảm đáng kể thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết của xi măng, làm tăng đáng kể cường độ nén ở 1 ngày và 7 ngày tuổi, với mức tăng lớn nhất ở mẫu sử dụng 0,4% CN đạt khoảng 33% (ở 1 ngày) và 18% (ở 7 ngày) so với mẫu đối chứng. Trong khoảng tỷ lệ CN được nghiên cứu, ảnh hưởng của CN tới nhiệt thủy hóa, thời gian đông kết và cường độ nén trở nên rõ rệt hơn khi tăng hàm lượng CN. Nghiên cứu cho thấy CN có tiềm năng được sử dụng hiệu quả để cải thiện cường độ tuổi sớm của xi măng Poóc lăng hỗn hợp.

KEYWORDS
ABSTRACT
Calcium nitrate
The objective of this study was to evaluate the influence of calcium nitrate (CN) dosage on selected properties of Blended Portland cement. The investigated CN contents were 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.4% by mass with smooth and mixing hooked-end steel fiber. The studied properties included normal consistency water demand, heat of hydration during the first 24 h, setting time, and compressive strength at 1 and 7 days. The results showed that increasing the CN content from 0% to 0.4% had no significant effect on the normal consistency water demand of the blended Portland cement. Hydration heat measurements indicated that CN significantly accelerated the early hydration process, resulting in higher paste temperatures compared with the reference sample. The addition of CN also substantially reduced the setting time of the cement; the specimen containing 0.4% CN exhibited a reduction of 35 min compared with the control sample. Furthermore, CN markedly enhanced the compressive strength at both 1 and 7 days. The greatest improvement was observed for the sample containing 0.4% CN, with increases of approximately 33% and 18% in compressive strength at 1 and 7 days, respectively, relative to the control sample. Within the investigated dosage range, the effects of CN on hydration heat, setting time, and compressive strength became more pronounced with increasing CN content. The findings demonstrate that CN can be effectively utilized as a chemical accelerator to improve the early-age strength development of blended Portland cement.

1. Giới thiệu

Ở Việt nam, xi măng được sản xuất và sử dụng phổ biến là xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Thành phần chính của các loại xi măng này bao gồm clanhke xi măng Poóc lăng, thạch cao và hỗn hợp phụ gia khoáng. Các phụ gia khoáng thường được sử dụng như đá vôi, đá bazan, tro bay, xỉ nhiệt điện và xỉ lò cao. Việc sử dụng phụ gia khoáng đem lại nhiều lợi ích cả về môi trường và kinh tế, kỹ thuật. Chúng làm giảm lượng clanhke sử dụng, dẫn tới giảm phát thải CO₂ và giảm giá thành sản phẩm. Việc dùng phụ gia khoáng còn có thể tăng độ bền trong môi trường xâm thực và cải thiện một số tính chất quan trọng của xi măng.

Chính vì vậy, các nhà máy luôn mong muốn tăng hàm lượng phụ gia khoáng có thể sử dụng. Tuy nhiên, việc này đối mặt với rào cản quan trọng do các phụ gia khoáng thường làm giảm tốc độ thủy hóa ở giai đoạn đầu khiến kéo dài quá trình đông kết và giảm cường độ tuổi sớm của xi măng.

Một trong những giải pháp có thể áp dụng để khắc phục vấn đề này của phụ gia khoáng là bổ sung phụ gia hóa học có khả năng thúc đẩy thủy hóa của xi măng [1-3]. Một trong những phụ gia hóa học được sử dụng từ lâu đó là canxi clorua (CaCl₂) [3]. CaCl₂ rất hiệu quả trong việc làm tăng cường độ tuổi sớm và tuổi muộn của xi măng, nhưng nó chứa ion clo gây ăn mòn cốt thép, làm hạn chế việc sử dụng CaCl₂ trong

*Liên hệ tác giả: dinh.nguyenduong@hust.edu.vn

Nhận ngày 04/06/2026, sửa xong ngày 18/06/2026, chấp nhận đăng ngày 19/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1394>