

Đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bởi natri silicat

Bùi Phương Trinh^{1,2*}, Lê Thị Thủy^{1,2}

¹ Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa Tp. HCM

² Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Độ chảy xòe
Cường độ chịu kéo khi uốn
Cường độ chịu nén
Hệ số hút nước do mao dẫn
Chất kiềm hoạt hóa

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung đánh giá đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa 20 % tro bay được hoạt hóa bởi natri silicat (Na_2SiO_3) nhằm nâng cao chất lượng của vữa xây dựng chứa tro bay ứng dụng trong các công trình xây dựng. Vữa xi măng được chế tạo với tỷ lệ nước/chất kết dính là 0,5 và tỷ lệ cát/chất kết dính là 2,5. Hàm lượng Na_2SiO_3 được thêm vào trong vữa chứa tro bay ở mức 0, 2 và 4 % theo khối lượng. Sau quá trình tạo hình và dưỡng hộ 24 ± 4 h trong khuôn, các mẫu vữa được tháo khuôn và dưỡng hộ trong nước trước khi tiến hành thí nghiệm các đặc tính kỹ thuật. Đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng được khảo sát bao gồm độ chảy xòe, cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ chịu nén và hệ số hút nước do mao dẫn. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng độ chảy xòe của vữa tươi nằm trong khoảng 90 – 160 mm, cường độ chịu kéo khi uốn và cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi của các mẫu vữa nằm trong khoảng 5,5 – 12,2 MPa và 38,7 – 50,4 MPa và hệ số hút nước do mao dẫn ở 28 ngày tuổi nằm trong khoảng 0,032 – 0,074 kg/m².phút 0,5. Việc bổ sung Na_2SiO_3 ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa 20 % tro bay. Mối quan hệ giữa các đặc tính kỹ thuật của vữa đóng rắn cũng được thiết lập. Kết luận rằng trong ba cấp phối vữa được thiết kế, vữa xi măng chứa 20 % tro bay được hoạt hóa bởi 2 % Na_2SiO_3 tối ưu có đặc tính kỹ thuật được cải thiện.

KEYWORDS

Flowability
Flexural strength
Compressive strength
Water absorption coefficient due to capillary action
Alkali activation

ABSTRACT

This study focused on evaluating the engineering properties of cement-based mortar with 20% fly ash activated by sodium silicate (Na_2SiO_3) to improve the quality of construction mortar with fly ash used in construction works. The cement-based mortars were prepared with a water-to-binder ratio of 0.5 and a sand-to-binder ratio of 2.5. The Na_2SiO_3 contents were added to the mortars at 0, 2, and 4% by mass. After shaping and curing for 24 ± 4 h in the molds, the mortar samples were demolded and cured in water before conducting the engineering properties tests. The engineering properties of the cement-based mortars investigated included flowability, flexural strength, compressive strength, and water absorption coefficient due to capillary action. The experimental results showed that the flowability of fresh mortars was in a range of 90 – 160 mm, the flexural strength and compressive strength at 28 d of mortar samples were in ranges of 5.5 – 12.2 MPa and 38.7 – 50.4 MPa, respectively, and water absorption coefficient due to capillary action at 28 d was in a range of 0.032 – 0.074 kg/m².min0.5. The addition of Na_2SiO_3 significantly affected the engineering properties of cement-based mortars containing 20% fly ash. The relationships between the engineering properties of hardened mortars were also established. Consequently, among the three designed mortars, the cement-based mortar with 20% fly ash activated by 2% Na_2SiO_3 as an optimal one had improved engineering properties.

1. Giới thiệu

Tốc độ đô thị hóa cùng sự phát triển kinh tế vượt bậc đã thúc đẩy nhu cầu xây dựng các công trình và cơ sở hạ tầng đáng kể, kéo theo làm gia tăng nhu cầu sử dụng các loại vật liệu xây dựng. Xi măng Portland là một trong các loại vật liệu chủ yếu sử dụng trong xây dựng. Tuy nhiên, quá trình sản xuất xi măng Portland đang gây tác động bất lợi đến môi trường như tiêu thụ lượng lớn nguồn nguyên liệu thiên nhiên (đá vôi và đất sét), nhiên liệu nung và thải ra khí CO_2 đáng kể [1-3]. Mặt khác, tro bay là phế phẩm được thải ra từ các nhà máy nhiệt điện sử dụng than làm nhiên liệu, đang chiếm diện tích đất và gây ra các tác động tiêu cực đến môi trường, con người và xã hội [1]. Chính

vì thế, tro bay đã được đề xuất làm vật liệu thay thế một phần xi măng Portland trong sản xuất vật liệu xây dựng, góp phần giảm lượng dùng xi măng, tái sử dụng phế thải tro bay, hướng đến bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và môi trường.

Hầu hết các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc thay thế xi măng Portland bằng tro bay góp phần cải thiện tính công tác của vữa/bê tông, nâng cao cường độ ở độ tuổi về sau và độ bền cho vữa/bê tông ứng dụng trong xây dựng [4-9]. Tuy nhiên, cường độ ban đầu ở độ tuổi sớm của hệ nền xi măng chứa tro bay lại rất thấp và nguyên nhân là do phản ứng pozzolanic của tro bay xảy ra rất chậm [9-15]. Phản ứng pozzolanic của tro bay là phản ứng giữa SiO_2 hoạt tính và Al_2O_3 hoạt tính trong tro bay với hàm lượng kiềm OH^- được tạo ra từ quá trình hydrat hóa của

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

Nhận ngày 20/05/2025, sửa xong ngày 03/06/2025, chấp nhận đăng ngày

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.1024>

xi măng để tạo ra các gel C-S-H và C-A-S-H lấp đầy lỗ rỗng và cải thiện các đặc tính kỹ thuật của hệ nền xi măng [9,11-15]. Do đó, một trong những giải pháp thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay trong hệ nền xi măng là sử dụng các loại chất hoạt hóa kiềm [11-15]. Các nghiên cứu trước thường tập trung vào khảo sát ảnh hưởng của canxi hydroxit, natri hydroxit, natri carbonat, natri sulfat hay thủy tinh lỏng ... đến phản ứng pozzolanic của tro bay trong hệ nền xi măng cũng như các đặc tính kỹ thuật của hệ nền xi măng chứa tro bay [11-15]. Trong khi, hiệu quả sử dụng natri silicat ở dạng bột đến phản ứng pozzolanic của tro bay và đặc tính kỹ thuật của hệ nền xi măng chứa tro bay vẫn chưa được khám phá.

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này chủ yếu tập trung tập trung đánh giá đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa 20 % tro bay được hoạt hóa bởi natri silicat (Na_2SiO_3) ở dạng bột nhằm góp phần làm giảm lượng phát thải CO_2 từ việc sản xuất xi măng, tăng cường khả năng tái sử dụng phế thải tro bay từ các nhà máy nhiệt điện và nâng cao đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa tro bay, hướng đến mở rộng ứng dụng loại vữa này trong ngành công nghiệp xây dựng, đồng thời góp phần bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và môi trường.

2. Thực nghiệm

2.1. Hệ nguyên vật liệu

Xi măng được sử dụng để chế tạo vữa xây dựng là xi măng

Portland của nhà máy Vicem Hà Tiên với các thông số kỹ thuật được trình bày ở Bảng 1, thỏa mãn theo TCVN 2682 : 2020 [16].

Trong khi đó, tro bay từ nhà máy nhiệt điện Vedan được sử dụng để thay thế một phần xi măng Portland với các thông số kỹ thuật được trình bày ở Bảng 1, thỏa mãn theo TCVN 10302 : 2014 [17]. Bên cạnh chất kết dính, chất hoạt hóa Na_2SiO_3 ở dạng bột và màu trắng được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của chất hoạt hóa đến đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa tro bay. Bên cạnh đó, nước (N) được sử dụng để chế tạo vữa là nguồn nước thủy cục, không chứa tạp chất, không có váng dầu mỡ, không màu và không mùi, thỏa mãn theo TCVN 4506 : 2012 [18]. Ngoài ra, cát sông thiên nhiên được sử dụng có mô đun độ lớn là 1,97; khối lượng riêng là $2,67 \text{ g/cm}^3$ và độ hút nước là 0,90 %, thỏa theo TCVN 7570 : 2006 [19].

2.2. Thiết kế cấp phối vữa

Dựa theo TCVN 6016 : 2011 [20] kết hợp quá trình thực nghiệm tại phòng thí nghiệm, vữa xi măng được chế tạo với hàm lượng tro bay thay thế xi măng Portland được cố định là 20 % theo khối lượng chất kết dính, tỷ lệ nước/chất kết dính là 0,5 và tỷ lệ cát/chất kết dính là 2,5. Dựa trên đề xuất của Jin và Han [21], hàm lượng Na_2SiO_3 được đưa vào trong vữa xi măng chứa tro bay ở mức 0, 2 và 4 % theo khối lượng chất kết dính. Bảng 2 thể hiện ba cấp phối của vữa xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bởi 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 .

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của chất kết dính.

Chỉ tiêu kỹ thuật	Đơn vị	Xi măng	Tro bay
Thành phần hóa			
CaO	%	59,71	9,22
SiO_2	%	27,13	51,20
Al_2O_3	%	4,97	18,58
Fe_2O_3	%	0	17,01
SO_3	%	3	0,39
Na_2O & K_2O	%	0,34	1,60
Mất khi nung	%	2,0	2,63
Khối lượng riêng	g/cm^3	3,10	1,98
Lượng nước tiêu chuẩn	%	30	-
Thời gian bắt đầu ninh kết	phút	140	-
Thời gian kết thúc ninh kết	phút	170	-
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi	MPa	60,4	-
Chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày tuổi	%	-	98,92

- : không thí nghiệm

Bảng 2. Cấp phối cho 1 m^3 vữa.

Thành phần	Đơn vị: kg/m^3				Na_2SiO_3 (% theo khối lượng chất kết dính)
	Cát	Nước	Xi măng	Tro bay	
F20Na0	1391	278	445	111	0
F20Na2	1391	278	445	111	2
F20Na4	1391	278	445	111	4

FxxNay bao gồm F: tro bay; xx là % tro bay thay thế xi măng; Na là Na_2SiO_3 ; y là % Na_2SiO_3 thêm vào trong vữa xi măng chứa tro bay.

2.3. Quy trình chế tạo mẫu vữa

Quy trình nhào trộn vữa tươi được thực hiện theo TCVN 6016 : 2011 [20] với các bước sau: (1) cân khối lượng hệ nguyên vật liệu của từng cấp phối vữa theo Bảng 2; (2) đổ lần lượt cát, xi măng, tro bay và Na_2SiO_3 (nếu có) vào trong máy trộn (Hình 1 (a)); (3) khởi động máy và trộn đều trong 30 s để hỗn hợp khô đồng nhất; (4) dừng máy trộn và vét hỗn hợp khô dính trên thành và cánh máy; (5) đổ nước đã được định lượng theo Bảng 2 của từng cấp phối vữa vào máy trộn và tiếp tục trộn trong 30 s; (6) dừng máy trộn và vét hỗn hợp dính trên thành và cánh máy; (7) tiếp tục trộn trong 60 s để thu được vữa tươi đồng nhất. Sau đó, vữa tươi được đem đi thí nghiệm để xác định độ lưu động và phần còn lại của vữa tươi được đổ vào các khuôn hình lăng trụ với kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm. Sau khi dưỡng hộ 24 ± 4 h trong khuôn, các mẫu vữa được tháo khuôn và được thí nghiệm ở 1 ngày tuổi; trong khi, các mẫu vữa còn lại tiếp tục được dưỡng hộ trong nước ở nhiệt độ 27 ± 2 °C (Hình 1 (b)) đến các ngày tuổi thí nghiệm.



(a) Trộn hỗn hợp khô



(b) Dưỡng hộ mẫu trong nước

Hình 1. Thao tác nhào trộn và dưỡng hộ mẫu vữa.

2.4. Quy trình thí nghiệm

Các đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 được khảo sát bao gồm độ chảy xòe, cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ chịu nén và hệ số hút nước do mao dẫn. Độ chảy xòe đặc trưng cho độ lưu động của vữa tươi với quy trình thí nghiệm được thực hiện theo TCVN 3121-3 : 2022 [22], bao gồm các bước sau: (1) sau quá trình nhào trộn được trình bày ở mục 2.3, vữa tươi được đổ vào khâu hình côn đặt giữa tâm bàn dần theo hai lớp với mỗi lớp đầm 10 cái sao cho vữa lấp đầy khâu; (2) làm phẳng mặt và từ từ nhấc khâu lên theo phương thẳng đứng; (3) cho bàn dần thực hiện dần 15 cái trong 15 s; (4) đo đường kính đáy của khối vữa tươi chảy theo hai chiều vuông góc (Hình 2 (a)). Kết quả độ chảy xòe là giá trị trung bình cộng của hai lần thí nghiệm.

Cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn được xác định ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi theo TCVN 3121-11 : 2022 [23] với quy trình thí nghiệm bao gồm các bước sau: (1) đặt mẫu vào bộ gá uốn; (2) tiến

hành uốn mẫu với tốc độ tăng tải từ 10 – 50 N/s cho đến khi mẫu bị phá hủy (Hình 2 (b)); (3) ghi lại tải trọng lớn nhất gây phá hủy mẫu vữa. Cường độ chịu kéo khi uốn của mẫu vữa đóng rắn được tính toán theo công thức (1).

$$R_u = 1,5 \times \frac{P_u \times l}{b \times h^2} \quad (1)$$

Trong đó: R_u là cường độ chịu kéo khi uốn của mẫu vữa (N/mm^2 hay MPa); P_u là tải trọng uốn lớn nhất gây phá hủy mẫu vữa (N); l là khoảng cách giữa hai gối uốn (mm); b là chiều rộng của mẫu vữa (mm); h là chiều cao của mẫu vữa (mm).

Tiếp theo quy trình uốn, 6 nửa viên mẫu vữa gãy sau khi uốn 3 mẫu được đặt vào tấm nén giữa thớt nén dưới của máy (Hình 2 (c)) để tiến hành thí nghiệm cường độ chịu nén ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi của vữa đóng rắn với tốc độ gia tải theo TCVN 3121-11 : 2022 [23]. Cường độ chịu nén của mẫu vữa đóng rắn được tính toán theo công thức (2).

$$R_n = \frac{P_n}{A} \quad (2)$$

Trong đó: R_n là cường độ chịu nén của mẫu vữa (N/mm^2 hay MPa); P_n là tải trọng nén lớn nhất gây phá hủy mẫu vữa (N); A là diện tích tiết diện nén của mẫu vữa (mm^2).

Kết quả cường độ chịu kéo khi uốn của từng cấp phối vữa ở từng độ tuổi là giá trị trung bình cộng của ba mẫu vữa thí nghiệm tương ứng. Trong khi đó, kết quả cường độ chịu kéo nén của từng cấp phối vữa ở từng độ tuổi là giá trị trung bình cộng của sáu mẫu vữa thí nghiệm tương ứng. Bên cạnh đó, hệ số hút nước do mao dẫn của mẫu vữa đóng rắn ở 28 ngày tuổi được xác định theo TCVN 3121-18 : 2022 [24] là giá trị trung bình cộng của ba mẫu vữa thí nghiệm tương ứng ở từng cấp phối vữa. Quy trình thí nghiệm hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn bao gồm các bước sau: (1) nửa các viên mẫu vữa ở 28 ngày tuổi sau khi uốn được đem đi sấy khô ở nhiệt độ 60 ± 5 °C; (2) sau khi được làm nguội ở nhiệt độ phòng, mẫu được nhúng vào nước ở độ sâu bằng 5 mm (Hình 2 (d)); (3) sau 10 phút nhúng, mẫu được lấy ra khỏi nước và được lau khô bề mặt; (4) mẫu được cân khối lượng để ghi nhận giá trị (m_1); (5) mẫu được nhúng ngay lập tức vào nước ở độ sâu bằng 5 mm và lặp lại theo quy trình cho đến 90 phút, mẫu được lấy ra khỏi nước và lau khô bề mặt; (6) mẫu được cân khối lượng để ghi nhận giá trị (m_2). Hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn được tính toán theo công thức (3).

$$C = 0,1 \times (m_2 - m_1) \quad (3)$$

Trong đó: C là hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{phút}^{0,5}$); m_1 là khối lượng của viên mẫu sau 10 phút ngâm nước (g); m_2 là khối lượng của viên mẫu sau 90 phút ngâm nước (g).



(a) Thí nghiệm độ chảy xòe



(b) Thí nghiệm uốn mẫu vữa



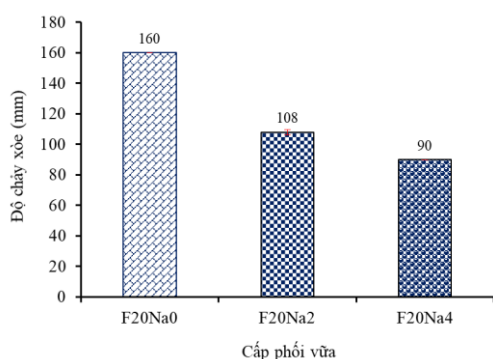
(c) Thí nghiệm nén mẫu vữa (d) Thí nghiệm hệ số hút nước do mao dẫn của mẫu vữa

Hình 2. Quy trình thí nghiệm các đặc tính kỹ thuật của vữa.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Độ chảy xẹp của vữa tươi

Kết quả độ chảy xẹp của vữa tươi chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 được thể hiện ở Hình 3. Giá trị độ chảy xẹp của vữa tươi F20Na0, F20Na2 và Fa20Na4 lần lượt đạt 160, 108 và 90 mm. Khi so với vữa tươi F20Na0, vữa tươi F20Na2 và Fa20Na4 có độ chảy xẹp thấp hơn lần lượt 32,5 % và 43,8 %; chứng tỏ rằng việc sử dụng chất hoạt hóa Na_2SiO_3 đã làm giảm độ chảy xẹp, tức làm giảm độ lưu động của vữa tươi. Việc giảm độ lưu động càng đáng kể khi tăng hàm lượng chất hoạt hóa Na_2SiO_3 . Nguyên nhân có thể là do chất hoạt hóa Na_2SiO_3 đã làm gia tăng nồng độ kiềm trong vữa tươi, dẫn đến thúc đẩy việc kết tụ của các hạt trong hệ nền xi măng và tạo ra hiệu ứng liên kết trong hệ nền; kết quả là độ chảy xẹp của vữa tươi giảm [25].



Hình 3. Độ chảy xẹp của vữa tươi chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 .

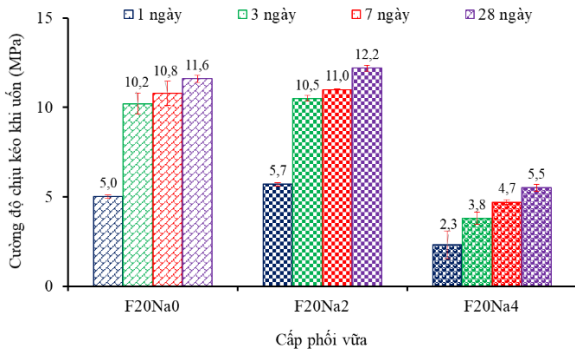
3.2. Cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn

Kết quả cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 được thể hiện ở Hình 4. Ở 1 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn lần lượt đạt 5,0; 5,7 và 2,3 MPa. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 1 ngày tuổi cao hơn 14,0 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 1 ngày tuổi đạt giá trị thấp nhất, cụ thể: thấp hơn 54,0 % khi so với mẫu vữa

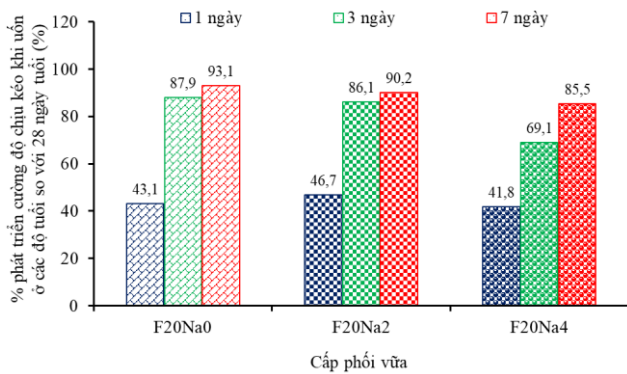
F20Na0 và thấp hơn 59,6 % khi so với mẫu vữa F20Na2. Ở 3 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn lần lượt đạt 10,2; 10,5 và 3,8 MPa. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 3 ngày tuổi chỉ cao hơn 2,9 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 3 ngày tuổi vẫn đạt giá trị thấp nhất, cụ thể: thấp hơn 62,7 % khi so với mẫu vữa F20Na0 và thấp hơn 63,8 % khi so với mẫu vữa F20Na2. Ở 7 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn lần lượt đạt 10,8; 11,0 và 4,7 MPa. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 7 ngày tuổi chỉ cao hơn 1,9 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 7 ngày tuổi vẫn đạt giá trị thấp nhất, cụ thể: thấp hơn 56,5 % khi so với mẫu vữa F20Na0 và thấp hơn 57,3 % khi so với mẫu vữa F20Na2. Ở 28 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn lần lượt đạt 11,6; 12,2 và 5,5 MPa. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 28 ngày tuổi chỉ cao hơn 5,2 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có cường độ chịu kéo khi uốn ở 28 ngày tuổi tiếp tục đạt giá trị thấp nhất, cụ thể: thấp hơn 52,6 % khi so với mẫu vữa F20Na0 và thấp hơn 54,9 % khi so với mẫu vữa F20Na2. Điều này, chứng tỏ rằng việc sử dụng 2 % chất hoạt hóa Na_2SiO_3 đã góp phần cải thiện đáng kể cường độ chịu kéo khi uốn ở độ tuổi sớm (tức 1 ngày tuổi) của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay; dẫn đến từ hiệu quả của Na_2SiO_3 đã thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay ở độ tuổi sớm, góp phần tạo ra các sản phẩm C-S-H và C-A-S-H lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc cho hệ nền vữa xi măng [11,21]. Tuy nhiên, việc cải thiện lại không đáng kể ở độ tuổi về sau trong nghiên cứu này và xu hướng này cũng được quan sát trong nghiên cứu trước của Jin và Han khi sử dụng natri sulfat làm chất hoạt hóa cho vữa xi măng chứa 50 % tro bay [21]. Trong khi đó, việc sử dụng 4 % Na_2SiO_3 lại làm giảm cường độ chịu kéo khi uốn đáng kể ở tất cả các ngày tuổi của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay. Xu hướng này cũng được quan sát trong nghiên cứu của Jin và Han khi sử dụng 6 % natri sulfat làm chất hoạt hóa cho vữa xi măng chứa 50 % tro bay [21]. Nguyên nhân có thể là do chất hoạt hóa Na_2SiO_3 quá nhiều đã làm gia tăng nồng độ kiềm trong hệ nền, dẫn đến làm trì hoãn quá trình hydrat hóa của xi măng [12,26] và các ion sulfat có khả năng kết hợp với sản phẩm trong hệ nền để tạo ra ettringite nở thể tích và gây nứt vi mô [21]. Phân tích cấu trúc của vữa xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bởi Na_2SiO_3 cần được thực hiện để xác nhận tác động này.

Hình 5 thể hiện sự phát triển cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi. Nhìn chung, tất cả các mẫu vữa đều có cường độ chịu kéo khi uốn phát triển theo thời gian, chứng tỏ rằng các quá trình phản ứng (bao gồm quá trình hydrat hóa của xi măng và phản ứng pozzolanic của tro bay) vẫn xảy ra theo thời gian, tạo ra các sản phẩm C-S-H và C-A-S-H lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc cho hệ nền vữa xi măng. Hình 5 cho thấy rằng cường độ chịu kéo khi uốn của các mẫu vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay ở 1, 3 và 7 ngày tuổi đạt từ 41,8 – 46,7 %; 69,1 – 87,9 % và 85,5 – 93,1 % so với 28 ngày tuổi. Từ Hình 5, rõ ràng quan sát rằng tốc độ phát triển cường độ chịu kéo khi

uốn ở 1 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi của mẫu vữa F20Na2 cao hơn khi so với các mẫu còn lại; trong khi, tốc độ phát triển cường độ chịu kéo khi uốn ở 1, 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi của mẫu vữa F20Na4 thấp hơn khi so với các mẫu còn lại (F20Na0 và Fa20Na2). Nguyên nhân có thể là do chất hoạt hóa Na_2SiO_3 ở mức 4 % đã có tác động bất lợi đến cường độ chịu kéo khi uốn của vữa xi măng chứa tro bay.



Hình 4. Cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi.



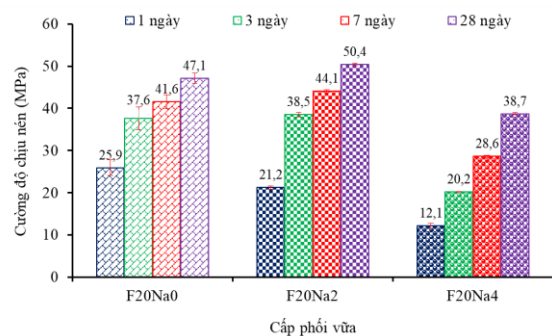
Hình 5. Sự phát triển cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi.

3.3. Cường độ chịu nén của vữa đóng rắn

Kết quả cường độ chịu nén của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 được thể hiện ở Hình 6. Ở 1 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu nén lần lượt đạt 25,9; 21,2 và 12,1 MPa. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 và Fa20Na4 có cường độ chịu nén ở 1 ngày tuổi thấp hơn lần lượt 18,1 % và 53,3 %. Ở 3 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu nén lần lượt đạt 37,6; 38,5 và 20,2 MPa. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có cường độ chịu nén ở 3 ngày tuổi có xu hướng cao khoảng 2,4 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có cường độ chịu nén ở 3 ngày tuổi đạt giá trị thấp nhất, cụ thể: thấp hơn 46,3 % khi so với mẫu vữa F20Na0 và thấp hơn 47,5 % khi so với mẫu vữa F20Na2. Ở 7 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu nén lần lượt đạt 41,6; 44,1 và 28,6 MPa. Khi so với mẫu

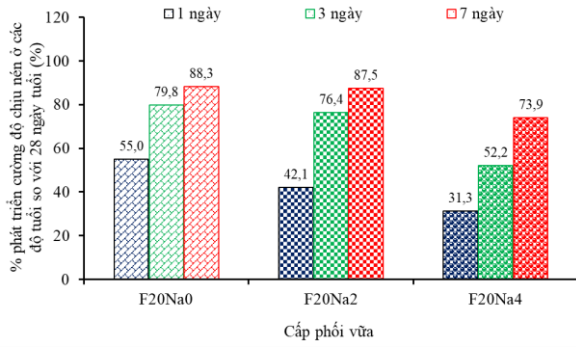
F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có cường độ chịu nén ở 7 ngày tuổi cao hơn 6,0 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có cường độ chịu nén ở 7 ngày tuổi vẫn đạt giá trị thấp nhất, cụ thể: thấp hơn 31,3 % khi so với mẫu vữa F20Na0 và thấp hơn 35,1 % khi so với mẫu vữa F20Na2. Ở 28 ngày tuổi, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có cường độ chịu nén lần lượt đạt 47,1; 50,4 và 38,7 MPa. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi cao hơn 7,0 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi vẫn tiếp tục đạt giá trị thấp nhất, cụ thể: thấp hơn 17,8 % khi so với mẫu vữa F20Na0 và thấp hơn 23,2 % khi so với mẫu vữa F20Na2. Điều này, chứng tỏ rằng việc sử dụng 2 % chất hoạt hóa Na_2SiO_3 đã góp phần cải thiện nhẹ cường độ chịu nén sau 3 ngày tuổi của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay; tuy nhiên, việc cải thiện này ở độ tuổi sớm 1 ngày lại không được quan sát như kết quả cường độ chịu kéo khi uốn (Hình 4). Việc cải thiện do bổ sung 2 % Na_2SiO_3 đã thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay ở độ tuổi sớm, góp phần tạo ra các sản phẩm C-S-H và C-A-S-H lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc cho hệ nền vữa xi măng [11,21]. Trong khi đó, việc sử dụng 4 % Na_2SiO_3 lại làm giảm cường độ chịu nén đáng kể ở tất cả các ngày tuổi của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay. Xu hướng này được quan sát tương tự như kết quả cường độ chịu kéo khi uốn trong nghiên cứu này (Hình 4). Nguyên nhân có thể là do quá trình hydrat hóa của xi măng đã bị trì hoãn bởi chất hoạt hóa [12,26] và sự hình thành ettringite ở độ tuổi về sau gây nứt vi mô [21].

Nhìn chung, tất cả các mẫu vữa đều có cường độ chịu nén phát triển theo thời gian, tương tự như sự phát triển cường độ chịu kéo khi uốn theo thời gian (Hình 5). Hình 7 cho thấy rằng cường độ chịu nén của các mẫu vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay ở 1, 3 và 7 ngày tuổi đạt từ 31,3 – 55,0 %; 52,2 – 79,8 % và 73,9 – 88,3 % so với 28 ngày tuổi. Từ Hình 7, rõ ràng quan sát rằng tốc độ phát triển cường độ chịu nén ở 1, 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi của mẫu vữa F20Na2 và F20Na4 thấp hơn khi so với mẫu vữa F20Na0, chứng tỏ rằng việc sử dụng chất hoạt hóa đã không góp phần cải thiện tốc độ phát triển cường độ chịu nén của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay.



Hình 6. Cường độ chịu nén của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi.

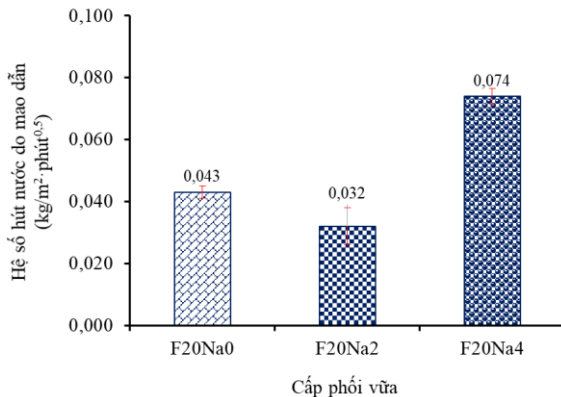
Hình 7 thể hiện sự phát triển cường độ chịu nén của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi.



Hình 7. Sự phát triển cường độ chịu nén của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3 và 7 ngày tuổi so với 28 ngày tuổi.

3.4. Hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn

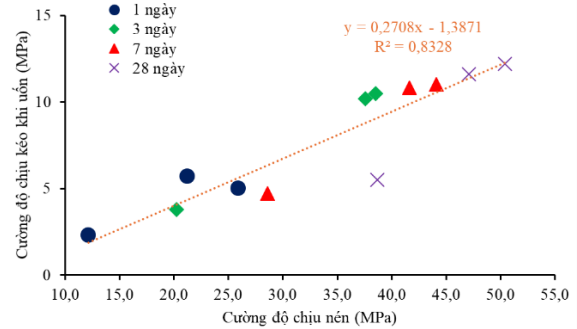
Kết quả hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 28 ngày tuổi được thể hiện ở Hình 8 và nhận thấy rằng, các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 có hệ số hút nước do mao dẫn lần lượt đạt 0,043; 0,032 và 0,074 $\text{kg/m}^2\cdot\text{phút}^{0,5}$. Khi so với mẫu F20Na0, mẫu vữa F20Na2 có hệ số hút nước do mao dẫn thấp hơn 25,6 %. Trong khi đó, mẫu vữa Fa20Na4 có hệ số hút nước do mao dẫn cao nhất, cụ thể: cao hơn gấp 1,7 lần khi so với mẫu vữa F20Na0 và cao hơn gấp 2,3 lần khi so với mẫu vữa F20Na2. Nguyên nhân dẫn đến hệ số hút nước do mao dẫn cao trong mẫu F20Na4 có thể là do cấu trúc của vữa có nhiều lỗ rỗng mao dẫn, dẫn đến từ việc trì hoãn quá trình hydrat hóa của xi măng và sự hình thành ettringite gây nứt vi mô do sử dụng chất hoạt hóa Na_2SiO_3 ở mức 4 % [12,21,26]. Trong khi đó, hệ số hút nước do mao dẫn của mẫu Fa20Na2 thấp hơn so với Fa20Na0, chứng tỏ rằng việc sử dụng chất hoạt hóa Na_2SiO_3 ở mức 2 % đã thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay nhằm tạo ra các sản phẩm C-S-H và C-A-S-H góp phần cải thiện cấu trúc của vữa [11]. Phân tích cấu trúc của các mẫu vữa đóng rắn cần được thực hiện về sau để xác nhận hiệu quả của việc sử dụng chất hoạt hóa Na_2SiO_3 ở mức 2 %.



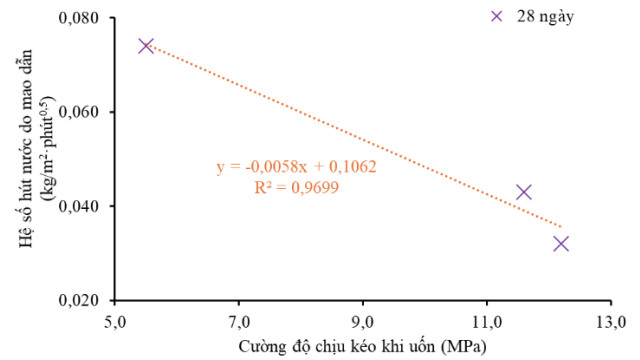
Hình 8. Hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi.

3.5. Mối quan hệ giữa các đặc tính kỹ thuật

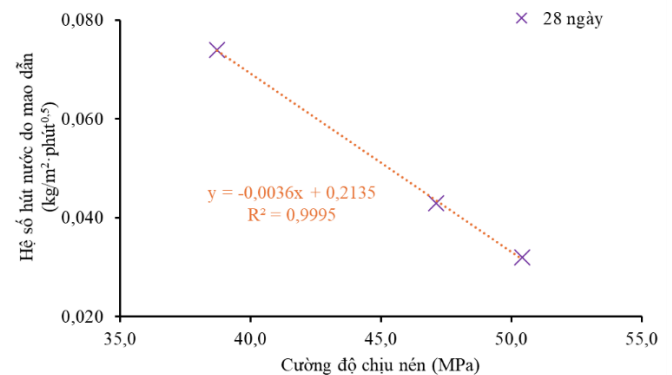
Hình 9 thể hiện mối quan hệ thuận giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi với R^2 tương đối cao ($= 0,8328$). Mối quan hệ này chứng tỏ rằng vữa xi măng chứa tro bay có cường độ chịu nén cao thì cường độ chịu kéo khi uốn cũng cao và ngược lại, không phụ thuộc vào độ tuổi và chất hoạt hóa Na_2SiO_3 .



Hình 9. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của vữa đóng rắn.



Hình 10. Mối quan hệ giữa cường độ chịu kéo khi uốn và hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn ở 28 ngày tuổi.



Hình 11. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn ở 28 ngày tuổi.

Hình 10 thể hiện mối quan hệ giữa cường độ chịu kéo khi uốn và hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 28 ngày tuổi; trong khi, Hình 11 thể hiện mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn chứa 20 % tro bay và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 ở 28 ngày tuổi. Cả hai mối quan hệ này là mối quan hệ nghịch với R^2 cao ($R^2 > 0,96$), chứng tỏ rằng vữa đóng rắn với đặc tính cơ học cao sẽ có hệ số hút nước do mao dẫn thấp và ngược lại.

4. Kết luận

Dựa trên kết quả thực nghiệm đánh giá đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa 20 % tro bay loại F và 0, 2 và 4 % Na_2SiO_3 (tức F20Na0, F20Na2 và Fa20Na4) đến 28 ngày tuổi, nghiên cứu này đưa ra một vài kết luận chính sau:

(1) Độ chảy xòe của vữa tươi F20Na0, F20Na2 và Fa20Na4 nằm trong khoảng 90 – 160 mm. Việc sử dụng chất hoạt hóa Na_2SiO_3 từ 2 – 4 % đã làm giảm độ chảy xòe từ 32,5 – 43,8 %.

(2) Cường độ chịu kéo khi uốn của các mẫu vữa F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi nằm trong khoảng 2,3 – 5,7 MPa; 3,8 – 10,5 MPa; 4,7 – 11,0 MPa và 5,5 – 12,2 MPa. Việc sử dụng 2 % chất hoạt hóa Na_2SiO_3 đã góp phần cải thiện đáng kể cường độ chịu kéo khi uốn ở độ tuổi sớm (tức 1 ngày tuổi) của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay (khoảng 14,0 %). Tuy nhiên, việc cải thiện lại không đáng kể ở độ tuổi về sau. Trong khi đó, việc sử dụng 4 % Na_2SiO_3 lại làm giảm cường độ chịu kéo khi uốn đáng kể ở tất cả các ngày tuổi của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay.

(3) Cường độ chịu nén của các mẫu vữa F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 ở 1, 3, 7 và 28 ngày tuổi nằm trong khoảng 12,1 – 25,9 MPa; 20,2 – 38,5 MPa; 28,6 – 44,1 MPa và 38,7 – 50,4 MPa. Việc sử dụng 2 % chất hoạt hóa Na_2SiO_3 đã góp phần cải thiện nhẹ cường độ chịu nén sau 3 ngày tuổi của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay (khoảng 2,4 – 7,0 %). Tuy nhiên, việc cải thiện này ở độ tuổi sớm (tức 1 ngày tuổi) lại không được quan sát. Trong khi đó, việc sử dụng 4 % Na_2SiO_3 lại làm giảm cường độ chịu nén đáng kể ở tất cả các ngày tuổi của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay.

(4) Hệ số hút nước do mao dẫn của các mẫu F20Na0, Fa20Na2 và F20Na4 ở 28 ngày tuổi nằm trong khoảng 0,032 – 0,074 $\text{kg/m}^2\text{phút}^{0.5}$. Việc sử dụng 2 % chất hoạt hóa Na_2SiO_3 đã góp phần làm giảm hệ số hút nước do mao dẫn của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay (khoảng 25,6 %). Trong khi đó, việc sử dụng 4 % Na_2SiO_3 lại làm gia tăng đáng kể hệ số hút nước do mao dẫn của mẫu vữa xi măng chứa 20 % tro bay.

(5) Các mối quan hệ giữa các đặc tính kỹ thuật của vữa xi măng chứa 20 % tro bay được thiết lập, chứng tỏ rằng vữa đóng rắn với đặc tính cơ học cao sẽ có hệ số hút nước do mao dẫn thấp và ngược lại.

Trong ba cấp phối vữa thiết kế, vữa xi măng chứa 20 % tro bay được hoạt hóa bởi 2 % Na_2SiO_3 tối ưu về các đặc tính kỹ thuật bao gồm độ chảy xòe phù hợp và đạt 108 mm, cường độ chịu kéo khi uốn và cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi đạt giá trị cao nhất, lần lượt đạt 12,2

và 50,4 MPa và hệ số hút nước do mao dẫn đạt giá trị thấp nhất và bằng 0,032 $\text{kg/m}^2\text{phút}^{0.5}$. Các nghiên cứu sâu hơn về cấu trúc và độ bền của vữa xi măng chứa hàm lượng lớn tro bay cần được triển khai tiếp theo.

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]. T. Hemalatha, A. Ramaswamy, "A review on fly ash characteristics - Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, pp. 546–559, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>.
- [2]. B. Liu, J. Qin, J. Shi, J. Jiang, X. Wu, Z. He, "New perspectives on utilization of CO_2 sequestration technologies in cement-based materials," *Construction and Building Materials*, vol. 272, 121660, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121660>.
- [3]. Y. Shi, Y. Li, H. Wang, "Eco-friendly solid waste-based cementitious material containing a large amount of phosphogypsum: performance optimization, micro-mechanisms, and environmental properties," *Journal of Cleaner Production*, vol. 471, 143335, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143335>.
- [4]. M. Kumar, A.K. Sinha, J. Kujur, "Mechanical and durability studies on high-volume fly-ash concrete," *Structural Concrete*, vol. 22, pp. 1036–1049, 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.202000020>.
- [5]. J. Yang, L. Zeng, X. He, Y. Su, Y. Li, H. Tan, B. Jiang, H. Zhu, S.-K. Oh, "Improving durability of heat-cured high volume fly ash cement mortar by wet-grinding activation," *Construction and Building Materials*, vol. 289, 123157, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123157>.
- [6]. A.M. Onaizi, N.H.A.S. Lim, G.F. Huseien, M. Amran, C.K. Ma, "Effect of the addition of nano glass powder on the compressive strength of high volume fly ash modified concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, pp. 1789–1795, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.347>.
- [7]. K.I.M. Ibrahim, "Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, e00630, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00630>.
- [8]. J. Yu, M. Zhang, G. Li, J. Meng, C.K. Leung, "Using nano-silica to improve mechanical and fracture properties of fiber-reinforced high-volume fly ash cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 239, 117853, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117853>.
- [9]. L. Lam, Y.L. Wong, C.S. Poon, "Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 747–756, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00213-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00213-1).
- [10]. T. Hemalatha, S. Sasmal, "Early-age strength development in fly ash blended cement composites: Investigation through chemical activation," *Magazine of Concrete Research*, vol. 71, pp. 260–270, 2019. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00336>.
- [11]. C.Y. Lee, H.K. Lee, K.M. Lee, "Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 425–431, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00973-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00973-0).

- [12]. P.T. Bui, Y. Ogawa, K. Nakarai, K. Kawai, "A study on pozzolanic reaction of fly ash cement paste activated by an injection of alkali solution," *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 28–34, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.046>.
- [13]. P.T. Bui, Y. Ogawa, K. Nakarai, K. Kawai, "Effect of internal alkali activation on pozzolanic reaction of low-calcium fly ash cement paste," *Materials and Structures*, vol. 49, pp. 3039–3053, 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0703-6>.
- [14]. P.T. Bui, Y. Ogawa, K. Kawai, "Long-term pozzolanic reaction of fly ash in hardened cement-based paste internally activated by natural injection of saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution," *Materials and Structures*, vol. 51, 144, 2018. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1274-0>.
- [15]. B. Park, Y.C. Choi, "Effects of fineness and chemical activators on the hydration and physical properties of high-volume fly-ash cement pastes," *Journal of Building Engineering*, vol. 51, 104274, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104274>.
- [16]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 2682 : 2020 Xi măng Poóc Lăng - Yêu cầu kỹ thuật," 17 trang, 2020.
- [17]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 10302 : 2014 Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng," 51 trang, 2014.
- [18]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 4506:2012 Nước cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật," 17 trang, 2012.
- [19]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 7570 : 2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật," 11 trang, 2006.
- [20]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 6016 : 2011 Xi măng – Phương pháp thử - Xác định cường độ," 37 trang, 2011.
- [21]. W. Jin, C. Han, "Mechanical properties of sisal fiber-reinforced fly ash cement mortar activated by sodium sulfate," *Construction and Building Materials*, vol. 445, 137925, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137925>.
- [22]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 3121-3 : 2022 Vữa xây dựng – Phương pháp thử - Phần 3: Xác định độ lưu động của vữa tươi (phương pháp bàn dẫn)," 5 trang, 2022
- [23]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 3121-11 : 2022 Vữa xây dựng – Phương pháp thử - Phần 11: Xác định cường độ uốn và nén của vữa đóng rắn," 9 trang, 2022.
- [24]. Bộ Khoa học và công nghệ, "TCVN 7572-18 : 2006 - Phương pháp thử - Phần 18: Xác định hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đóng rắn," 6 trang, 2006.
- [25]. I. Cavusoglu, E. Yilmaz, A.O. Yilmaz, "Sodium silicate effect on setting properties, strength behavior and microstructure of cemented coal fly ash backfill," *Powder Technology*, vol. 384, pp. 17–28, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.013>.
- [26]. O. Onuaguluchi, R. Ratu, N. Banthia, "Effect of sodium sulfate activation on the early-age matrix strength and steel fiber bond in high volume fly ash (HVFA) cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 341, 127808, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127808>.