

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ DƯỠNG HỘ BAN ĐẦU ĐẾN CƯỜNG ĐỘ NÉN CỦA HỆ NỀN XI MĂNG CHỨA TRO BAY ĐƯỢC HOẠT HÓA BẰNG NATRI SULFAT

Bùi Phương Trinh^{a,b,*}, Nguyễn Ngọc Thành^{a,b}, Nguyễn Đình Phương Quyên^{a,b},

Đặng Thanh Hàng^{a,b}, Lê Anh Tuấn^{a,b}

^aKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh,
số 268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bĐại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, quận Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 10/12/2020, Sửa xong 03/01/2021, Chấp nhận đăng 25/01/2021

Tóm tắt

Nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu đến cường độ nén của hệ nền xi măng chứa 0 và 40% tro bay được hoạt hóa bằng natri sulfat (Na_2SO_4). Hàm lượng Na_2SO_4 là 0 và 4% theo khối lượng chất kết dính. Sau 24 h, các mẫu được dưỡng hộ ở các nhiệt độ khác nhau (27 ± 2 °C, 60 °C và 100 °C trong lò sấy) trong 6 h. Dưỡng hộ ban đầu ở nhiệt độ cao đã cải thiện cường độ nén ở 3 ngày tuổi của mẫu chứa tro bay được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 . Tuy nhiên, cường độ nén ở 7 ngày và 28 ngày tuổi của các mẫu này lại thấp hơn khi so với mẫu được dưỡng hộ ở 27 ± 2 °C. Điều này chứng tỏ rằng dưỡng hộ ban đầu ở nhiệt độ cao đã ảnh hưởng bất lợi đến cường độ nén về sau của hệ nền xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 .

Từ khoá: chất hoạt hóa; cường độ nén; độ linh động; hệ nền xi măng; natri sulfat; nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu; thời gian ninh kết; tro bay.

EFFECT OF INITIAL CURING TEMPERATURE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT PASTES WITH FLY ASH ACTIVATED BY SODIUM SULFATE

Abstract

The present study focused on investigating effect of initial curing temperature on compressive strength of cement pastes with 0 and 40% replacements with fly ash activated by sodium sulfate (Na_2SO_4). The Na_2SO_4 amounts were 0 and 4% by mass of binder. After 24 h, all specimens were cured at various temperatures (27 ± 2 °C, 60 °C, and 100 °C in a drying oven) for 6 h. Initial curing at high temperature improved the compressive strength at 3 days of the cement paste containing fly ash activated by Na_2SO_4 . However, the compressive strength at the ages of 7 and 28 days of such paste was lower when compared with the paste cured at 27 ± 2 °C. It indicates that initial curing at high temperature adversely affected compressive strength at later ages of cement paste containing fly ash activated by Na_2SO_4 .

Keywords: activator; compressive strength; flow diameter; cement paste; sodium sulfate; initial curing temperature; setting time; fly ash.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(1V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(1V)-02) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

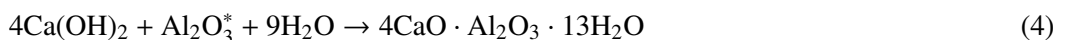
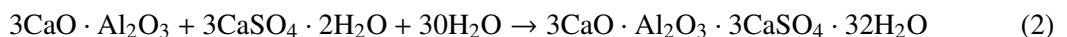
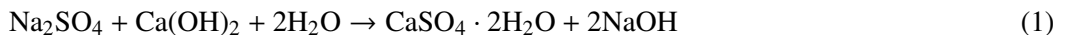
Tro bay là phế thải từ các nhà máy nhiệt điện sử dụng than làm nguồn nhiên liệu chính và hiện đang được ứng dụng rộng rãi như một loại phụ gia khoáng hoạt tính thay thế một phần xi măng trong

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: buihuongtrinh@hcmut.edu.vn (Trinh, B. P.)

việc chế tạo bê tông [1–3]. Việc sử dụng tro bay đem lại nhiều lợi ích như giảm lượng dùng xi măng, kéo theo giảm việc khai thác đá vôi và đất sét và giảm lượng khí CO₂ thải ra từ quá trình sản xuất xi măng; tận dụng tối đa nguồn phế thải tro bay; giảm giá thành xây dựng và góp phần cải thiện một số tính chất cơ lý cũng như nâng cao độ bền cho bê tông tro bay [2, 4–6]. Tuy nhiên, bê tông xi măng chứa tro bay thỉnh thoảng có cường độ ban đầu thấp hơn so với bê tông chứa 100% xi măng [7–9], đặc biệt khi sử dụng hàm lượng tro bay lớn; điều này là do phản ứng pozzolanic của tro bay xảy ra rất chậm trong thời gian ban đầu [5, 10, 11]. Chính vì thế, bê tông tro bay vẫn còn hạn chế ở một số các ứng dụng thực tế khi yêu cầu cường độ ban đầu cao như các công trình cần rút ngắn tiến độ thi công, các cấu kiện bê tông đúc sẵn, bê tông cường độ cao, ...

Việc sử dụng tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) thấp đã được đề xuất để khắc phục nhược điểm trên của tro bay cũng như mở rộng việc tận dụng tro bay trong bê tông cường độ cao [11, 12]. Lam và cs. [11] và Poon và cs. [12] đã nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng tro bay thay thế xi măng đến sự phát triển cường độ của bê tông có tỷ lệ N/CKD thấp và nhận thấy rằng tro bay đã góp phần chi phối đáng kể đến việc cải thiện cường độ nén của bê tông có tỷ lệ N/CKD thấp. Tuy nhiên, cường độ ban đầu của bê tông sử dụng tro bay và có tỷ lệ N/CKD thấp vẫn thấp hơn so với cường độ ban đầu của bê tông sử dụng 100% xi măng và 0% tro bay.

Gần đây, việc sử dụng các chất hoạt hóa, đặc biệt chất hoạt hóa sulfat đã được đề xuất để thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay và khắc phục nhược điểm về cường độ ban đầu thấp của bê tông tro bay [4, 7, 13–15]. Shi và Day [4] đã sử dụng chất hoạt hóa natri sulfat (Na₂SO₄) vào hệ nền vôi – tro bay và nhận thấy rằng việc sử dụng này đã làm gia tăng hoạt tính pozzolanic của tro bay, dẫn đến làm gia tăng cường độ của hệ nền. Các tác giả cũng kết luận rằng khi sử dụng Na₂SO₄ với hàm lượng từ 3-5% theo khối lượng chất kết dính thì việc cải thiện cường độ ở tuổi 90 và 180 ngày là đáng kể. Hiệu quả của chất hoạt hóa Na₂SO₄ đến quá trình thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay trong hệ nền xi măng cũng được đánh giá ở các nghiên cứu của Shi [13], Qian và cs. [7], Lee và cs. [14] và Bùi và cs. [15]. Lee và cs. [14] đã tìm thấy rằng khi 4% Na₂SO₄ được thêm vào hệ nền, cường độ ban đầu tăng nhanh nhưng giảm dần và đạt giá trị tương đương khi so với hệ nền không có chất hoạt hóa sau 7 và 28 ngày. Trong khi đó, Bùi và cs. [15] nhận thấy rằng 4% Na₂SO₄ đã làm gia tăng không những cường độ ban đầu mà còn về sau của hệ nền xi măng chứa 20 và 40% tro bay được dưỡng hộ ở 29±1 °C. Điều này là do việc thêm chất hoạt hóa Na₂SO₄ vào hệ nền đã góp phần thúc đẩy sự hình thành sớm các khoáng ettringite (3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O) lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc cho hệ nền theo các phương trình phản ứng (1) và (2); đồng thời đã thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay theo các phương trình phản ứng (3) và (4) thông qua hàm lượng Ca(OH)₂ trong hệ nền giảm và hàm lượng các sản phẩm hydrat hóa (bao gồm canxi silicat và aluminat) tăng [15].



[SiO₂* và Al₂O₃* là oxyt silic và oxyt nhôm hoạt tính trong tro bay]

Nhìn chung, chất hoạt hóa Na₂SO₄ góp phần đem lại hiệu quả thúc đẩy phản ứng pozzolanic của tro bay trong hệ nền xi măng chủ yếu được dưỡng hộ ở nhiệt độ thường, đặc biệt khi hệ nền với hàm lượng tro bay lớn. Trong khi đó, việc áp dụng nhiệt độ dưỡng hộ cao cũng đang được xem là một trong những phương pháp nhằm cải thiện tính chất của tro bay [16, 17].

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu đến cường độ nén của hệ nền xi măng chứa 40% tro bay được hoạt hóa bằng Na₂SO₄ nhằm đánh giá việc

áp dụng chế độ dưỡng hộ nhiệt ban đầu có thật sự phù hợp và hiệu quả để cải thiện các tính chất của hệ nền xi măng chứa hàm lượng lớn tro bay được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 , góp phần hướng đến nền công nghiệp xây dựng mang tính bền vững. Khi việc áp dụng chế độ dưỡng hộ nhiệt ban đầu có thể góp phần nâng cao tính chất của hệ nền xi măng chứa hàm lượng lớn tro bay thì ảnh hưởng của tổ hợp bao gồm chế độ dưỡng hộ nhiệt ban đầu và việc hoạt hóa bằng Na_2SO_4 đến các tính chất của bê tông sẽ được cân nhắc trong quá trình thiết kế cấp phối bê tông cũng như ứng dụng trong thực tế tại các nhà máy cấu kiện bê tông đúc sẵn. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến độ linh động, thời gian ninh kết và cường độ nén của hệ nền xi măng chứa và không chứa tro bay cũng được nghiên cứu.

2. Thực nghiệm

2.1. Hệ nguyên vật liệu

Xi măng Portland PC40 của nhà máy Vicem Hà Tiên thỏa mãn theo TCVN 2682:2009 [18] và tro bay loại F của nhà máy Duyên Hải 1 thỏa mãn theo TCVN 10302:2014 [19] được sử dụng như chất kết dính trong nghiên cứu này. Chỉ tiêu cơ lý và thành phần hóa học của xi măng và tro bay được thể hiện ở Bảng 1 và 2.

Bảng 1. Chỉ tiêu cơ lý của xi măng và tro bay

Chỉ tiêu	Đơn vị	Xi măng	Tro bay
Khối lượng riêng	g/cm^3	3,1	2,26
Lượng sót lại trên sàng 0,09 mm	%	0,1	-
Lượng sót lại trên sàng 0,045 mm	%	-	3,80

- : không thí nghiệm

Bảng 2. Thành phần hóa học của xi măng và tro bay

Thành phần hóa học	Đơn vị	Xi măng	Tro bay
SiO_2	%	21,98	51,6
Al_2O_3	%	4,28	20,9
Fe_2O_3	%	2,53	9,3
CaO	%	62,57	0,4
Na_2O	%	0,37	-
K_2O	%	0,01	-
MgO	%	1,56	1,4
SO_3	%	1,89	-
Mất khi nung	%	2,89	5,8

- : không thí nghiệm

Nước sử dụng trong nghiên cứu này là nước thủy cục, không chứa váng dầu mỡ, không có tạp chất, không màu, không mùi thỏa mãn theo TCVN 4506:2012 [20]. Chất hoạt hóa natri sulfat được sử dụng ở dạng rắn khan, chứa 99% Na_2SO_4 và có khối lượng riêng là $2,66 \text{ g/cm}^3$.

2.2. Thành phần cấp phối

Hệ nền xi măng với tỷ lệ N/CKD thấp là 0,30 được chuẩn bị để cải thiện một phần cường độ ban đầu cho hệ nền đồng thời tận dụng một hàm lượng lớn tro bay trong hệ nền. Hàm lượng tro bay thay thế xi măng là 0 và 40% theo khối lượng chất kết dính. Hàm lượng chất hoạt hóa Na_2SO_4 cho vào trong hệ nền là 0 và 4% theo khối lượng chất kết dính, dựa trên nghiên cứu của Bùi và cs. [15]. Bảng 3 thể hiện thành phần cấp phối theo tỷ lệ khối lượng của hệ nền xi măng trong nghiên cứu này.

Bảng 3. Cấp phối theo tỷ lệ khối lượng

Cấp phối	Nước	Xi măng	Tro bay	Na_2SO_4
Fa00Na0	0,30	1,00	0,00	0,00
Fa00Na4	0,30	1,00	0,00	0,04
Fa40Na0	0,30	0,60	0,40	0,00
Fa40Na4	0,30	0,60	0,40	0,04

2.3. Quy trình nhào trộn

Việc nhào trộn hồ chất kết dính được thực hiện thông qua máy trộn vữa tự động theo TCVN 6016:2011 [21]. Đối với hệ nền có chứa chất hoạt hóa, nước và Na_2SO_4 được hòa tan với nhau để tạo thành dung dịch kiềm. Sau khi cân định lượng từng nguyên vật liệu thành phần, xi măng và tro bay được đưa vào trong cối trộn và dùng bay trộn đều hỗn hợp khô. Sau đó, tiến hành cho nước hoặc dung dịch kiềm (bao gồm nước và chất hoạt hóa Na_2SO_4 đã được chuẩn bị trước đó) vào cối trộn, và bắt đầu trộn trong 30 giây. Sau khi dùng máy trộn và tiến hành vét lượng hồ bám dính ở thành cối và tâm cối, tiếp tục nhào trộn hỗn hợp trong 90 giây. Sau khi nhào trộn đồng nhất, các tính chất kỹ thuật của hỗn hợp được tiến hành kiểm tra theo mục 2.4.

2.4. Kiểm tra độ chảy xòe và thời gian ninh kết

a. Độ chảy xòe

Độ chảy xòe của hỗn hợp được kiểm tra với việc tham khảo TCVN 3121-3:2003 [22] và có điều chỉnh phù hợp cho hệ nền xi măng, cụ thể theo các bước sau: (1) hỗn hợp được cho vào trong côn đã được làm ẩm và đặt ở giữa bàn dần, theo hai lớp, mỗi lớp đầm 10 cái bằng que đầm; (2) nhắc côn lên theo phương thẳng đứng; (3) dẫn 15 cái trong 15 giây; (4) dùng thước đo hai đường kính lớn nhất của hỗn hợp trên bàn dần. Độ chảy xòe của hỗn hợp được xác định bằng giá trị trung bình của hai đường kính lớn nhất.

b. Thời gian ninh kết

Thời gian ninh kết bao gồm thời gian bắt đầu và kết thúc ninh kết của hỗn hợp được xác định theo TCVN 6017:2015 [23]. Thời gian bắt đầu ninh kết là thời gian tính từ thời điểm chất kết dính nhào trộn với nước hoặc dung dịch kiềm, cho đến khi kim nhỏ Vicat cách đáy vành khâu từ 3 đến 9 mm. Trong khi đó, thời gian kết thúc ninh kết là thời gian tính từ thời điểm chất kết dính nhào trộn với nước hoặc dung dịch kiềm, cho đến khi kim Vicat cắm vào hồ là 0,5 mm.

2.5. Chuẩn bị mẫu và quy trình dưỡng hộ

a. Chuẩn bị mẫu

Sau khi nhào trộn đồng nhất, hỗn hợp được cho vào trong các khuôn thép có kích thước 50×50×50 mm đã được vệ sinh và bôi dầu, theo hai lớp và mỗi lớp được dằn 60 cái bằng bàn dằn nhằm đảm bảo cho hỗn hợp lấp đầy khuôn.

b. Quy trình dưỡng hộ

Sau khi tạo hình, các mẫu được dưỡng hộ trong khuôn trong 24 h ở điều kiện phòng thí nghiệm. Sau 24 h, các mẫu được tháo khuôn và được dưỡng hộ ở các điều kiện sau: (1) ở 60 °C trong 6 h trong lò sấy; và (2) ở 100 °C trong 6 h trong lò sấy. Sau 6 h dưỡng hộ nhiệt trong lò sấy, các mẫu được dưỡng hộ ở 27±2 °C cho đến ngày xác định cường độ nén. Bên cạnh đó, các mẫu đối chứng được dưỡng hộ ở 27±2 °C cho đến ngày xác định cường độ nén cũng được chuẩn bị để khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu đến cường độ nén của hệ nền xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bằng natri sulfat.

2.6. Kiểm tra cường độ nén

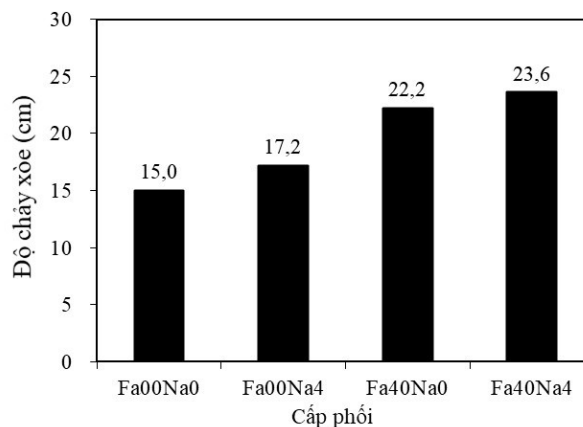
Cường độ nén của các mẫu được xác định ở tuổi 1, 3, 7 và 28 ngày thông qua máy nén thủy lực theo TCVN 6016:2011 [21]. Giá trị cường độ nén của mỗi cấp phối ở từng độ tuổi cụ thể là giá trị trung bình của ba mẫu tương ứng.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến độ chảy xòe

Hình 1 thể hiện ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến độ chảy xòe của hồ xi măng có và không có tro bay. Nhìn chung, việc sử dụng tro bay làm tăng tính công tác của hồ xi măng hay hỗn hợp bê tông [8, 24, 25]. Xu hướng này cũng được quan sát trong nghiên cứu này. Cụ thể: độ chảy xòe của hồ xi măng chứa 40% tro bay (Fa40Na0 và Fa40Na4) lớn hơn so với độ chảy xòe của hồ xi măng chứa 0% tro bay (Fa00Na0 và Fa00Na4). Điều này là do các hạt tro bay ở dạng hình cầu và bề mặt trơn nhẵn nên làm giảm ma sát khô trong hệ nền, dẫn đến làm tăng tính công tác cho hỗn hợp [8].

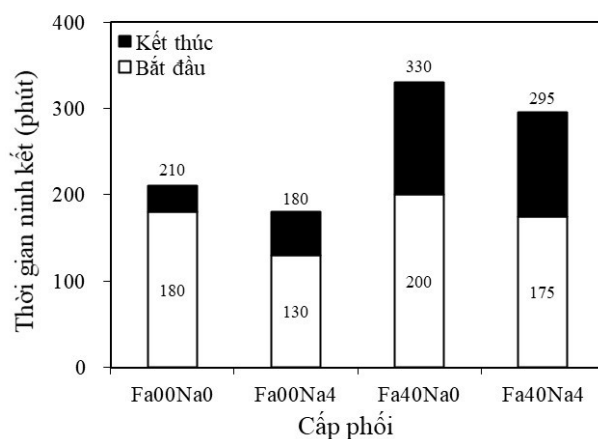
Từ Hình 1, nhận thấy rằng việc sử dụng chất hoạt hóa đã làm gia tăng độ chảy xòe của hồ xi măng có và không có tro bay. Kết quả này cũng được báo cáo trong nghiên cứu của Bùi và cs. [26]. Điều này có thể là do hàm lượng kiềm gia tăng trong hệ nền sử dụng Na_2SO_4 [27].



Hình 1. Ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến độ chảy xòe của hồ xi măng có và không có tro bay

3.2. Ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến thời gian ninh kết

Hình 2 thể hiện ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến thời gian bắt đầu và kết thúc ninh kết của hồ xi măng có và không có tro bay. Khi so sánh hệ nền Fa00Na0 và Fa40Na0, nhận thấy rằng tro bay đã kéo dài thời gian bắt đầu ninh kết của hồ xi măng chứa 0% Na_2SO_4 là 20 phút và thời gian kết thúc ninh kết là 120 phút. Khi so sánh hệ nền Fa00Na4 và Fa40Na4, tro bay đã kéo dài thời gian bắt đầu ninh kết của hồ xi măng chứa 4% Na_2SO_4 là 45 phút và thời gian kết thúc ninh kết là 115 phút. Sự kéo dài thời gian ninh kết do việc sử dụng tro bay cũng đã được báo cáo trong một số nghiên cứu đi trước [8, 15, 24]. Điều này được giải thích là do hệ nền chứa 60% xi măng và 40% tro bay (Fa40) có hàm lượng xi măng thấp hơn và hàm lượng tro bay nhiều hơn khi so với hệ nền chứa 100% xi măng và 0% tro bay (Fa00). Hàm lượng xi măng trong hệ nền Fa40 thấp dẫn đến hàm lượng các khoáng chính (C_3S , C_2S , C_3A và C_4AF) của xi măng cũng thấp; trong khi đó, tro bay chỉ ở dạng trợ, đóng vai trò chất lấp đầy, và không tham gia phản ứng pozzolanic ở giai đoạn này. Ngoài ra, sự kéo dài thời gian bắt đầu ninh kết do tro bay trong hồ xi măng chứa 4% Na_2SO_4 cao hơn 25 phút so với hồ xi măng chứa 0% Na_2SO_4 . Điều này có thể là do thời gian bắt đầu ninh kết của hồ xi măng Fa00Na4 (130 phút) được rút ngắn đáng kể do việc sử dụng 4% Na_2SO_4 , xem Hình 2.

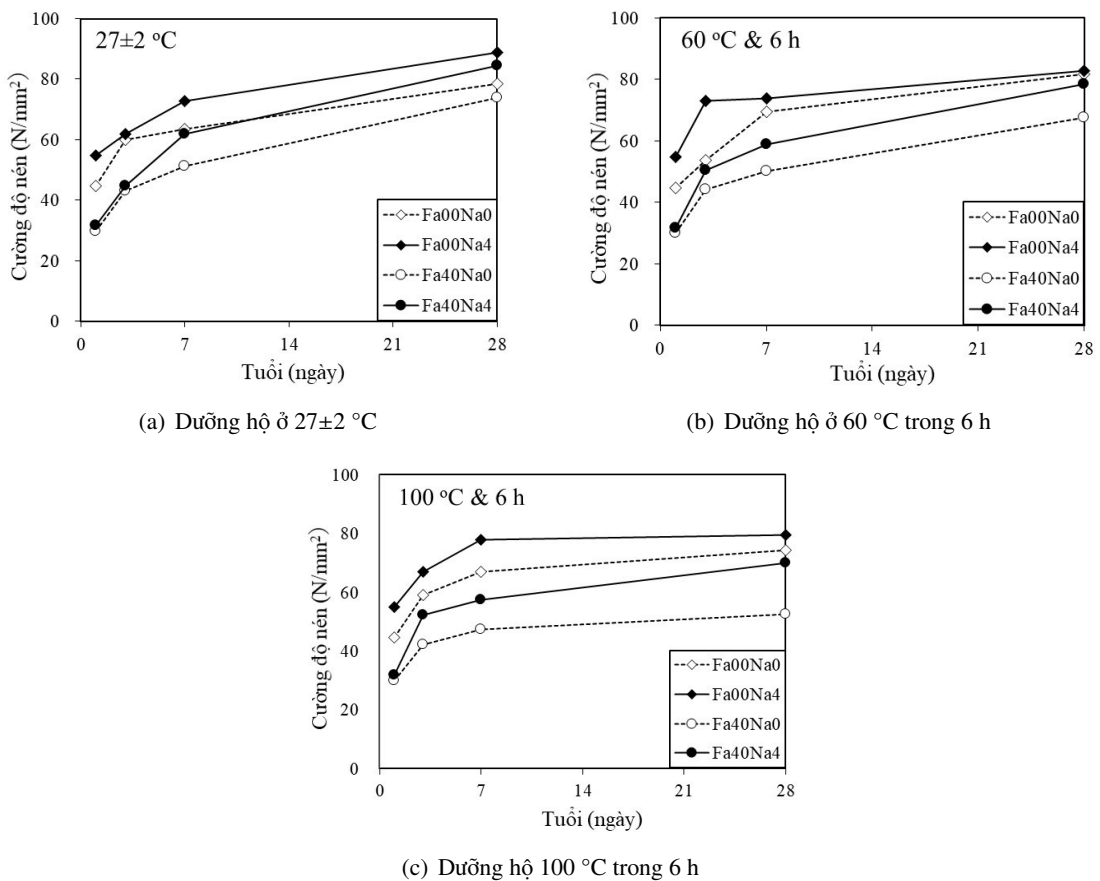


Hình 2. Ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến thời gian ninh kết của hồ xi măng có và không có tro bay

Mặt khác, việc sử dụng chất hoạt hóa Na_2SO_4 đã rút ngắn thời gian ninh kết của hồ xi măng không có tro bay (Fa00). Cụ thể: khi so sánh hệ nền Fa00Na0 và Fa00Na4, chất hoạt hóa Na_2SO_4 đã rút ngắn thời gian bắt đầu ninh kết của hồ xi măng chứa 0% tro bay là 50 phút và thời gian kết thúc ninh kết là 30 phút. Xu hướng rút ngắn thời gian ninh kết do sử dụng chất hoạt hóa Na_2SO_4 cũng được quan sát trong hồ xi măng có tro bay (Fa40). Cụ thể: khi so sánh hệ nền Fa40Na0 và Fa40Na4, chất hoạt hóa Na_2SO_4 đã rút ngắn thời gian bắt đầu ninh kết của hồ xi măng chứa 40% tro bay là 25 phút và thời gian kết thúc ninh kết là 35 phút. Xu hướng rút ngắn thời gian ninh kết bởi chất hoạt hóa Na_2SO_4 cũng được tìm thấy trong nghiên cứu của Bùi và cs. [15]. Kumar và Kameswara Rao [28] đã kết luận rằng loại và nồng độ của ion sulfat (SO_4^{2-}) có ảnh hưởng đáng kể đến thời gian ninh kết của hồ xi măng do chúng chi phối đến sự hòa tan của các hợp chất trong xi măng. Do đó, việc rút ngắn thời gian ninh kết do chất hoạt hóa Na_2SO_4 có khả năng là do sự thúc đẩy việc hòa tan các ion canxi trong hệ nền xi măng [15]. Việc rút ngắn thời gian ninh kết do chất hoạt hóa Na_2SO_4 có thể sẽ ảnh hưởng bất lợi đến quá trình thi công thật tế nhưng nếu ứng dụng cho các nhà máy cấu kiện bê tông đúc sẵn, điều này góp phần nâng cao năng suất sản xuất.

3.3. Ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến sự phát triển cường độ nén

Hình 3(a), 3(b), và 3(c) thể hiện ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến sự phát triển cường độ nén của hệ nền xi măng có và không có tro bay được dưỡng hộ lần lượt ở $27\pm 2^\circ\text{C}$, 60°C và 100°C trong 6 h trong lò sấy và sau đó dưỡng hộ ở $27\pm 2^\circ\text{C}$. Nhìn chung, tất cả các mẫu đều có cường độ phát triển theo thời gian, bao gồm mẫu có và không có tro bay, có và không có chất hoạt hóa cũng như có và không có áp dụng nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu. Điều này chứng tỏ rằng quá trình hydrat hóa của xi măng và phản ứng pozzolanic của tro bay vẫn tiếp tục diễn ra theo thời gian. Thông thường, việc sử dụng tro bay làm giảm cường độ của hệ nền [7–9]. Xu hướng này cũng được tìm thấy trong nghiên cứu này, cụ thể: cường độ nén của các mẫu có sử dụng tro bay (Fa40Na0 và Fa40Na4) luôn thấp hơn khi so với các mẫu tương ứng không có sử dụng tro bay (Fa00Na0 và Fa00Na4) ở tất cả các độ tuổi và ở các điều kiện dưỡng hộ khác nhau. Cường độ nén thấp của hệ nền xi măng tro bay là do (1) phản ứng pozzolanic của tro bay xảy ra chậm và (2) hàm lượng xi măng trong hệ nền thấp [5, 8, 10, 11].



Hình 3. Ảnh hưởng của chất hoạt hóa Na_2SO_4 đến sự phát triển cường độ nén của hệ nền xi măng có và không có tro bay

Bảng 4 thể hiện phần trăm gia tăng cường độ nén giữa hệ nền có sử dụng chất hoạt hóa Na_2SO_4 khi so với hệ nền không sử dụng chất hoạt hóa được tính toán theo công thức (5). Khi sử dụng chất hoạt hóa Na_2SO_4 , hầu hết đều có sự gia tăng đáng kể cường độ nén của hệ nền xi măng có và không có tro bay, không phụ thuộc vào nhiệt độ dưỡng hộ. Điều này là do việc thêm chất hoạt hóa Na_2SO_4

vào hệ nền đã góp phần thúc đẩy sự hình thành sớm các khoáng ettringite lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc cho hệ nền, đồng thời đã thúc đẩy phản ứng pozzolaníc của tro bay [15]. Từ Bảng 4, nhận thấy quy luật gia tăng cường độ của các cấp phối không rõ ràng. Điều này có thể phụ thuộc vào cường độ nén của mỗi cấp phối sử dụng 0% Na₂SO₄ ở từng độ tuổi khác nhau ($R_{FaxxNa0}^t$).

$$\% \text{ gia tăng cường độ nén của } R_{FaxxNa4}^t = \frac{(R_{FaxxNa4}^t - R_{FaxxNa0}^t)}{R_{FaxxNa0}^t} \times 100\% \quad (5)$$

trong đó $R_{FaxxNa4}^t$ là cường độ nén của hệ nền sử dụng 4% Na₂SO₄ ở t ngày tuổi (N/mm²); $R_{FaxxNa0}^t$ là cường độ nén của hệ nền sử dụng 0% Na₂SO₄ ở t ngày tuổi (N/mm²); Faxx là hệ nền chứa 0% tro bay (Fa00) hoặc hệ nền chứa 40% tro bay (Fa40); t là ngày tuổi (tức 1, 3, 7 hoặc 28 ngày tuổi).

Bảng 4. Phần trăm gia tăng cường độ nén giữa hệ nền có sử dụng chất hoạt hóa Na₂SO₄ khi so với hệ nền không sử dụng chất hoạt hóa (%)

Nhiệt độ dưỡng hộ	Cấp phối	Tuổi (ngày)			
		1	3	7	28
27±2 °C	Fa00Na4	22,8	3,0	14,6	13,2
	Fa40Na4	6,0	4,0	20,6	14,4
60 °C	Fa00Na4	22,8	35,7	6,5	1,1
	Fa40Na4	6,0	14,3	17,1	16,1
100 °C	Fa00Na4	22,8	13,6	16,4	7,3
	Fa40Na4	6,0	24,2	20,9	33,3

Bảng 5 thể hiện phần trăm gia tăng cường độ nén ở 3, 7 và 28 ngày tuổi so với 1 ngày tuổi của tất cả hệ nền có và không có tro bay, có và không có sử dụng chất hoạt hóa Na₂SO₄ được tính toán theo công thức (6). Việc sử dụng tro bay kết hợp chất hoạt hóa Na₂SO₄ đã làm cải thiện đáng kể phần trăm gia tăng cường độ nén ở 28 ngày so với 1 ngày của hệ nền. Điều này là do phản ứng pozzolaníc của tro bay đã được thúc đẩy đáng kể ở tuổi 28 ngày bởi chất hoạt hóa Na₂SO₄.

$$\% \text{ gia tăng cường độ nén ở } t = \frac{(R_{FaxxNax}^t - R_{FaxxNax}^1)}{R_{FaxxNax}^1} \times 100\% \quad (6)$$

trong đó $R_{FaxxNax}^t$ là cường độ nén của hệ nền ở t ngày tuổi (N/mm²); $R_{FaxxNax}^1$ là cường độ nén của hệ nền ở 1 ngày tuổi (N/mm²); Faxx là hệ nền chứa 0% tro bay (Fa00) hoặc hệ nền chứa 40% tro bay (Fa40); Nax là hệ nền chứa 0% Na₂SO₄ (Na0) hoặc hệ nền chứa 4% Na₂SO₄ (Na4); t là ngày tuổi (tức 3, 7 và 28 ngày tuổi).

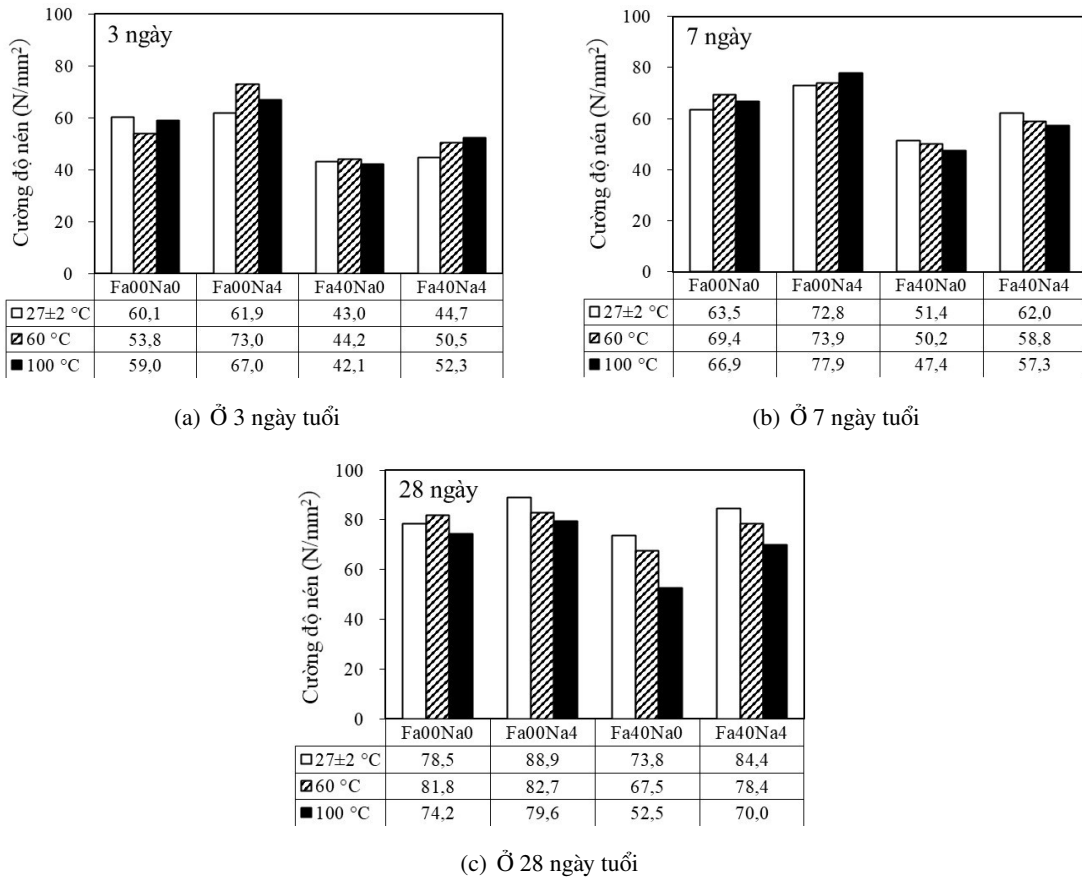
Bảng 5. Phần trăm gia tăng cường độ nén ở 3, 7 và 28 ngày tuổi so với 1 ngày tuổi (%)

Nhiệt độ dưỡng hộ	Cấp phối	Tuổi (ngày)		
		3	7	28
27±2 °C	Fa00Na0	34,5	42,1	75,6
	Fa00Na4	12,8	32,6	61,9
	Fa40Na0	43,8	71,9	146,8
	Fa40Na4	41,0	95,6	166,2
60 °C	Fa00Na0	20,4	55,3	83,0
	Fa00Na4	33,0	34,6	50,6
	Fa40Na0	47,8	67,9	125,8
	Fa40Na4	59,3	85,5	147,3
100 °C	Fa00Na0	32,0	49,7	66,0
	Fa00Na4	22,0	41,9	45,0
	Fa40Na0	40,8	58,5	75,6
	Fa40Na4	65,0	80,8	120,8

3.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu đến cường độ nén

Hình 4(a), 4(b) và 4(c) thể hiện ảnh hưởng của nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu đến cường độ nén ở 3, 7 và 28 ngày tuổi của hệ nền xi măng có và không có tro bay. Từ Hình 4(a), nhận thấy rằng ở 3 ngày tuổi, tất cả cường độ nén của hệ nền có chứa chất hoạt hóa (Fa00Na4 và Fa40Na4) được dưỡng hộ ở nhiệt độ cao đã được cải thiện hơn khi so với mẫu tương ứng được dưỡng hộ ở 27±2 °C. Việc cải thiện cường độ ban đầu cũng đã được báo cáo trong các nghiên cứu trước [29, 30]. Nhiệt độ dưỡng hộ cao đã chi phối đến sự hình thành của bộ khung bên trong bê tông và sự hình thành các sản phẩm hydrat hóa [29–31]. Điều này chứng tỏ rằng nhiệt độ dưỡng hộ cao đã góp phần thúc đẩy phản ứng hydrat hóa bao gồm phản ứng hình thành ettringite sớm trong hệ nền có chứa chất hoạt hóa, dẫn đến việc gia tăng cường độ trong nghiên cứu này. Trong khi đó, các mẫu không có chứa chất hoạt hóa (Fa00Na0 và Fa40Na0) được dưỡng hộ ở nhiệt độ cao có cường độ nén thấp hơn hoặc tương đương khi so với mẫu tương ứng được dưỡng hộ ở 27±2 °C, xem Hình 4(a). Nguyên nhân có thể là do vết nứt đã xuất hiện bên trong các mẫu khi được dưỡng hộ ở nhiệt độ cao [31]. Nguyên nhân khác cũng có thể là do nhiệt độ dưỡng hộ cao đã làm gia tăng tốc độ hydrat hóa, dẫn đến hình thành một lớp bao phủ bề mặt các hạt xi măng dày đặc và ngăn cản quá trình hydrat hóa [31]. Từ Hình 4(a), nhận thấy cường độ nén của mẫu Fa00Na0 được dưỡng hộ ở 100 °C cao hơn khi so với mẫu tương ứng được dưỡng hộ ở 60 °C. Điều này có thể là do hiệu quả thúc đẩy phản ứng hydrat hóa dưới tác dụng nhiệt độ dưỡng hộ ở 100 °C có phần vượt trội hơn tác động bất lợi từ sự xuất hiện các vết nứt. Phân tích cấu trúc các mẫu này cần được thực hiện trong tương lai để khẳng định nguyên nhân trên một cách chính xác hơn.

Từ Hình 4(b), nhận thấy rằng ở 7 ngày tuổi, nhiệt độ dưỡng hộ cao chỉ góp phần cải thiện cường độ nén của hệ nền không chứa tro bay (Fa00Na0 và Fa00Na4) và làm giảm nhẹ cường độ nén của hệ



Hình 4. Ảnh hưởng của nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu đến cường độ nén ở 3, 7 và 28 ngày tuổi của hệ nền xi măng có và không có tro bay

nền chứa tro bay (Fa40Na0 và Fa40Na4). Việc làm giảm cường độ nén của tất cả hệ nền cũng được quan sát ở 28 ngày tuổi, xem Hình 4(c). Nhiệt độ càng cao càng làm giảm cường độ về sau của hệ nền. Xu hướng này cũng đã được báo cáo trong nghiên cứu của Wang và cs. [31]. Điều này có thể là do cường độ về sau của hệ nền chủ yếu phụ thuộc vào điều kiện dưỡng hộ nhiệt ban đầu mà đã tác động đến quá trình hydrat hóa ban đầu của hệ nền [31]. Nhiệt độ dưỡng hộ ban đầu cao đã gây ra sự phân bố không đồng đều của quá trình hydrat hóa, dẫn đến sự xuất hiện của một số khu vực yếu kém trong hệ nền. Thêm vào đó, trong suốt quá trình hydrat hóa, ứng suất nhiệt cũng đã tạo ra hàm lượng lớn các lỗ rỗng vi mô do sự xuất hiện vết nứt, sự giãn nở nhiệt, sự chuyển dịch độ ẩm bên trong hệ nền [31]. Do đó, cấu trúc của hệ nền xi măng cần được phân tích chi tiết hơn ở nghiên cứu tiếp theo để kiểm chứng. Tóm lại, nhiệt độ dưỡng hộ cao đã làm giảm cường độ nén ở 28 ngày tuổi của tất cả hệ nền xi măng có và không có tro bay, có và không có chứa chất hoạt hóa. Do đó, cần thêm những nghiên cứu chuyên sâu hơn về việc áp dụng chế độ dưỡng hộ nhiệt ban đầu kết hợp với các chế độ dưỡng hộ khác phù hợp hơn để cải thiện các tính chất của hệ nền xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 .

4. Kết luận

Dựa trên các kết quả thực nghiệm, có thể đưa ra một số kết luận sau:

- Việc sử dụng Na_2SO_4 đã làm gia tăng độ chảy xòe và rút ngắn thời gian ninh kết của hồ xi măng chứa 40% tro bay. Khi hệ nền được dưỡng hộ ở 27 ± 2 °C, việc sử dụng Na_2SO_4 đã cải thiện cường độ nén của hệ nền xi măng chứa và không chứa tro bay ở tất cả các độ tuổi. Hiệu quả cải thiện cường độ nén do việc sử dụng Na_2SO_4 cũng được quan sát trong hệ nền được dưỡng hộ ở 60 và 100 °C.

- Dưỡng hộ ban đầu ở nhiệt độ cao (60 và 100 °C) đã cải thiện cường độ nén ban đầu (ở 3 ngày tuổi) của mẫu xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 . Tuy nhiên, dưỡng hộ ban đầu ở nhiệt độ cao đã ảnh hưởng bất lợi đến cường độ nén về sau của hệ nền xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 khi so với việc dưỡng hộ ở 27 ± 2 °C. Do đó, đề xuất việc áp dụng chế độ dưỡng hộ nhiệt ban đầu kết hợp với các chế độ dưỡng hộ khác phù hợp hơn để cải thiện các tính chất của hệ nền xi măng chứa tro bay được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 , để từ đó cân nhắc việc dưỡng hộ nhiệt ban đầu kết hợp với các chế độ dưỡng hộ khác cho bê tông chứa hàm lượng tro bay tối thiểu 40% được hoạt hóa bằng Na_2SO_4 trong quá trình sản xuất các cấu kiện bê tông đúc sẵn tại các nhà máy.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa - ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số T-KTXD-2020-22. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa - ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Zachar, J. (2011). [Sustainable and Economical Precast and Prestressed Concrete Using Fly Ash as a Cement Replacement](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6):789–792.
- [2] Hemalatha, T., Ramaswamy, A. (2017). [A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete](#). *Journal of Cleaner Production*, 147:546–559.
- [3] Hemalatha, T., Sasmal, S. (2019). [Early-age strength development in fly ash blended cement composites: investigation through chemical activation](#). *Magazine of Concrete Research*, 71(5):260–270.
- [4] Shi, C., Day, R. L. (1995). [Acceleration of the reactivity of fly ash by chemical activation](#). *Cement and Concrete Research*, 25(1):15–21.
- [5] Baert, G., Poppe, A.-M., Belie, N. D. (2008). [Strength and durability of high-volume fly ash concrete](#). *Structural Concrete*, 9(2):101–108.
- [6] Camões, A., Ferreira, R. M., Aguiar, B., Jalali, S. (2002). Durability of High Performance Concrete With Fly Ash. *Proceedings of Challenges of Concrete Construction: Concrete for Extreme Conditions*, 357–366.
- [7] Qian, J., Shi, C., Wang, Z. (2001). [Activation of blended cements containing fly ash](#). *Cement and Concrete Research*, 31(8):1121–1127.
- [8] Durán-Herrera, A., Juárez, C. A., Valdez, P., Bentz, D. P. (2011). [Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes](#). *Cement and Concrete Composites*, 33(1):39–45.
- [9] Bui, P. T., Ogawa, Y., Nakarai, K., Kawai, K., Sato, R. (2017). [Internal curing of Class-F fly-ash concrete using high-volume roof-tile waste aggregate](#). *Materials and Structures*, 50(4):1–12.
- [10] Feldman, R. F., Carette, G. G., Malhotra, V. M. (1990). [Studies on mechanics of development of physical and mechanical properties of high-volume fly ash-cement pastes](#). *Cement and Concrete Composites*, 12(4):245–251.
- [11] Lam, L., Wong, Y., Poon, C. (2000). [Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems](#). *Cement and Concrete Research*, 30(5):747–756.

- [12] Poon, C. S., Lam, L., Wong, Y. L. (2000). [A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash](#). *Cement and Concrete Research*, 30(3):447–455.
- [13] Shi, C. (1996). [Early microstructure development of activated lime-fly ash pastes](#). *Cement and Concrete Research*, 26(9):1351–1359.
- [14] Lee, C. Y., Lee, H. K., Lee, K. M. (2003). [Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems](#). *Cement and Concrete Research*, 33(3):425–431.
- [15] Bui, P. T., Ogawa, Y., Kawai, K. (2020). [Effect of Sodium Sulfate Activator on Compressive Strength and Hydration of Fly-Ash Cement Pastes](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6):04020117.
- [16] Bakharev, T. (2005). [Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing](#). *Cement and Concrete Research*, 35(6):1224–1232.
- [17] de Vargas, A. S., Molin, D. C. D., Vilela, A. C., da Silva, F. J., Pavão, B., Veit, H. (2011). [The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers](#). *Cement and Concrete Composites*, 33(6): 653–660.
- [18] TCVN 2682:2009. *Xi măng Poóc-lăng - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [19] TCVN 10302:2014. *Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [20] TCVN 4506:2012. *Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [21] TCVN 6016:2011. *Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [22] TCVN 3121-3:2003. *Vữa xây dựng - Phương pháp thử - Phần 3: Xác định độ lưu động của vữa tươi (phương pháp bàn dần)*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [23] TCVN 6017:2015. *Xi măng - Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [24] Huang, C.-H., Lin, S.-K., Chang, C.-S., Chen, H.-J. (2013). [Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash](#). *Construction and Building Materials*, 46: 71–78.
- [25] Chính, N. V., Thuật, Đ. C. (2020). [Ảnh hưởng của tro bay, silicafume và môi trường dưỡng hộ đến cường độ chịu nén của bê tông](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXD*, 14(3V):60–72.
- [26] Bui, P. T., Nguyen, A. K., Nguyen, N. H., Ogawa, Y., Kawai, K. (2018). [Effects of sodium-sulfate addition on consistency, setting time and compressive strength at early ages of fly ash-cement paste](#). *Proceedings of the 8th International Conference of Asian Concrete Federation*, Fuzhou, China.
- [27] AzariJafari, H., Kazemian, A., Ahmadi, B., Berenjian, J., Shekarchi, M. (2014). [Studying effects of chemical admixtures on the workability retention of zeolitic Portland cement mortar](#). *Construction and Building Materials*, 72:262–269.
- [28] Kumar, S., Rao, C. V. S. K. (1994). [Effect of sulfates on the setting time of cement and strength of concrete](#). *Cement and Concrete Research*, 24(7):1237–1244.
- [29] Klausen, A. E., Kanstad, T., Bjøntegaard, Ø., Sellevold, E. J. (2018). [The effect of realistic curing temperature on the strength and E-modulus of concrete](#). *Materials and Structures*, 51(6):168.
- [30] Cui, S., Liu, P., Su, J., Cui, E., Guo, C., Zhu, B. (2018). [Experimental study on mechanical and microstructural properties of cement-based paste for shotcrete use in high-temperature geothermal environment](#). *Construction and Building Materials*, 174:603–612.
- [31] Wang, M., Hu, Y., Wang, Q., Tian, H., Liu, D. (2019). [A study on strength characteristics of concrete under variable temperature curing conditions in ultra-high geothermal tunnels](#). *Construction and Building Materials*, 229:116989.