

Ảnh hưởng của thành phần xi măng đến tác động của natri sunfat tới tính chất của xi măng poóc lăng hỗn hợp

Nguyễn Dương Định^{1*}, Đỗ Minh Hiệp¹

¹ Đại học Bách khoa Hà Nội

TỪ KHOÁ

Natri sunfat
Xi măng Poóc lăng hỗn hợp
Cường độ nén
Nhiệt thủy hóa
Tính chất
Hàm lượng phụ gia khoáng

TÓM TẮT

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của thành phần xi măng đến tác động của natri sunfat tới các tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Nghiên cứu được thực hiện trên hai loại xi măng công nghiệp PCB30 và PCB40 của một nhà máy có hàm lượng phụ gia khoáng hoạt tính khác nhau, và hàm lượng Na_2SO_4 được khảo sát trong khoảng gồm 0%, 1%, 2%, và 3%. Các tính chất của xi măng được nghiên cứu bao gồm: lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết, nhiệt thủy hóa trong 24 giờ đầu, cường độ nén ở các tuổi 1, 3, 7 và 28 ngày, và độ ổn định thể tích. Kết quả cho thấy hàm lượng phụ gia khoáng trong xi măng không làm ảnh hưởng đáng kể tới khả năng giảm lượng nước tiêu chuẩn và độ nở của xi măng do Na_2SO_4 gây ra. Tuy nhiên việc tăng hàm lượng phụ gia khoáng hoạt tính làm tăng khả năng rút ngắn thời gian đông kết, tăng sự thúc đẩy thủy hóa của xi măng ở tuổi sớm, tăng cường độ 1 ngày, và hạn chế khả năng suy giảm cường độ ở các ngày 3, 7, 28 ngày do Na_2SO_4 mang lại. Các kết quả nghiên cứu cho thấy Na_2SO_4 có tiềm năng làm chất hoạt hóa cho các xi măng Poóc lăng hỗn hợp có hàm lượng clanhke thấp và có hàm lượng phụ gia khoáng hoạt tính cao.

KEYWORDS

Sodium sulfate
Blended Portland cement
Compressive strength
Heat of hydration
Properties
Mineral admixture content

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the influence of cement composition on the effects of sodium sulfate on the properties of blended Portland cements. The investigation was conducted using two industrial blended Portland cements, PCB30 and PCB40, produced by the same cement plant but containing different amounts of reactive mineral admixtures. Sodium sulfate (Na_2SO_4) was incorporated at dosages of 0%, 1%, 2%, and 3% by mass of cement. The properties evaluated included normal consistency water demand, setting time, hydration heat evolution during the first 24h, compressive strength at 1, 3, 7, and 28 days, and soundness. The results showed that the reactive mineral admixture content had little influence on the reduction in normal consistency water demand and expansion caused by Na_2SO_4 addition. However, increasing the content of reactive mineral admixtures enhanced the ability of Na_2SO_4 to shorten setting times, accelerate early-age hydration, and improve 1-day compressive strength. Moreover, higher mineral admixture contents mitigated the reduction in compressive strength observed at 3, 7, and 28 days following Na_2SO_4 addition. These findings indicate that Na_2SO_4 has significant potential as a chemical activator for low-clinker blended Portland cements containing high levels of reactive mineral admixtures.

1. Giới thiệu

Ngành công nghiệp xi măng hàng năm phát thải một lượng lớn CO_2 , chiếm khoảng 7–8 % tổng lượng CO_2 phát thải toàn cầu. Phát thải CO_2 trong quá trình sản xuất xi măng chủ yếu xuất phát từ quá trình sản xuất clanhke, do tiêu hao nhiều năng lượng và phân hủy đá vôi [1]. Nhu cầu xi măng và bê tông ngày càng tăng để đáp ứng sự phát triển hạ tầng và đô thị hóa đã làm gia tăng các lo ngại về tác động môi trường của ngành sản xuất xi măng. Để giải quyết vấn đề này, một giải pháp chiến lược được đặt ra là giảm tỷ lệ clanhke trong xi măng. Nhiều nghiên cứu gần cho thấy việc này có thể thực hiện thông qua việc sử dụng phụ gia khoáng, tối ưu hóa thành phần clanhke, và sử dụng các

chất hoạt hóa hóa học nhằm cải thiện quá trình thủy hóa và tính chất cơ học của các hệ xi măng hàm lượng clanhke thấp.

Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng, việc sử dụng ở tỷ lệ thích hợp phụ gia khoáng, như xi lò cao nghiền mịn, tro bay và đá vôi, để thay thế một phần clanhke mà vẫn đảm bảo tính năng kỹ thuật phù hợp [2, 3]. Tuy nhiên, việc giảm hàm lượng clanhke thường làm giảm tốc độ thủy hóa, kéo dài thời gian đông kết và giảm cường độ tuổi sớm, đặc biệt trong xi măng hỗn hợp có hàm lượng phụ gia khoáng cao [4, 5]. Để khắc phục các hạn chế này, nhiều chất hoạt hóa hóa học và các hợp chất chứa sunfat đã được nghiên cứu nhằm thúc đẩy phản ứng thủy hóa và tối ưu hóa sự phát triển vi cấu trúc của xi măng hỗn hợp [1, 6].

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

Nhận ngày 04/06/2026, sửa xong ngày 17/06/2026, chấp nhận đăng ngày 18/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1395>

Việc điều chỉnh hàm lượng sunfat có vai trò quan trọng trong quá trình thủy hóa xi măng. Các ion sunfat kiểm soát hoạt tính của các khoáng aluminat, ảnh hưởng đến sự hình thành ettringite và tác động đến động học thủy hóa của các khoáng silicat [7]. Cân bằng giữa lượng sunfat và mức độ hòa tan của aluminat ảnh hưởng lớn đến quá trình đông kết, tỏa nhiệt, và sự phát triển cường độ của xi măng. Neto và cộng sự [7] chỉ ra rằng hàm lượng sunfat ảnh hưởng đáng kể đến cơ chế thủy hóa, cấu trúc lỗ rỗng, thành phần pha và cường độ nén của xi măng Poóc lăng. Đồng thời, họ nhấn mạnh rằng hàm lượng sunfat tối ưu phụ thuộc vào thành phần khoáng của clanhke, loại phụ gia khoáng và sự có mặt của phụ gia hóa học.

Trong những năm gần đây, các nghiên cứu cho thấy natri sunfat (Na_2SO_4) là một chất hoạt hóa tiềm năng cho các hệ xi măng hàm lượng clanhke thấp và xi măng hỗn hợp [4-6, 8, 9]. So với các chất hoạt hóa có độ kiềm cao như natri hydroxit hoặc natri silicat, Na_2SO_4 có nhiều ưu điểm như tác động môi trường thấp hơn, chi phí thấp hơn, dễ thao tác và an toàn hơn. Ngoài ra, Na_2SO_4 có khả năng cung cấp đồng thời ion kiềm và ion sunfat, từ đó thúc đẩy quá trình hòa tan clanhke và phụ gia khoáng, đồng thời tăng cường hình thành ettringite và gel C-S-H [10, 11].

Cơ chế hoạt hóa của Na_2SO_4 đã được chỉ ra trong nhiều nghiên cứu. Trong hệ xi măng Poóc lăng và xi măng hỗn hợp, Na_2SO_4 làm tăng độ kiềm của dung dịch lỗ rỗng và thúc đẩy sự hòa tan của các pha aluminosilicat hoạt tính [10, 11]. Các ion sunfat của Na_2SO_4 phản ứng với các ion nhôm và canxi giải phóng từ quá trình hòa tan của các khoáng của xi măng để tạo thành ettringite, góp phần hình thành cấu trúc ban đầu và phát triển cường độ sớm. Đồng thời, độ kiềm tăng cũng thúc đẩy sự hòa tan của pha silicat và tăng tốc độ hình thành C-S-H [10, 11]. Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào ảnh hưởng của Na_2SO_4 đối với các hệ chứa xi [12-14]. Duan và cộng sự cho thấy Na_2SO_4 có thể hoạt hóa hiệu quả quá trình thủy hóa xi, làm tăng sự hình thành ettringite và gel C-A-S-H, từ đó cải thiện cường độ nén sớm và làm đặc vi cấu trúc [12]. Tương tự, các nghiên cứu về xi măng xi hoạt hóa bằng kiềm-sunfat cho thấy Na_2SO_4 thúc đẩy hòa tan xi và tăng tốc phản ứng thủy hóa hiệu quả [15]. Ngoài ra, Na_2SO_4 cũng được chứng minh

là cải thiện tính chất của hệ tro bay hàm lượng cao thông qua việc thúc đẩy phản ứng puzolan và rút ngắn giai đoạn thụ động [10, 16, 17].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về hệ chất kết dính hoạt hóa bằng Na_2SO_4 , phần lớn các nghiên cứu tập trung vào hệ clanhke đơn, từng loại phụ gia khoáng cụ thể hoặc hệ kiềm hoạt hóa xi và tro bay. Số lượng nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của Na_2SO_4 đối với xi măng hỗn hợp có hàm lượng phụ gia khoáng khác nhau còn hạn chế.

Bên cạnh các phụ gia trợ nghiền và tăng cường độ gốc alkanolamine như TEA, TIPA và DEIPA đang được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp xi măng, Na_2SO_4 là một chất hoạt hóa vô cơ có cơ chế tác động khác biệt. Trong khi các phụ gia alkanolamine chủ yếu ảnh hưởng đến quá trình thủy hóa clanhke và hiệu quả nghiền, Na_2SO_4 đồng thời cung cấp ion kiềm và ion sunfat, qua đó có khả năng thúc đẩy phản ứng của các phụ gia khoáng hoạt tính. Với ưu điểm giá thành thấp, nguồn cung dồi dào và tiềm năng hỗ trợ tăng tỷ lệ thay thế clanhke, Na_2SO_4 được xem là một giải pháp đáng quan tâm cho phát triển các hệ xi măng phát thải thấp.

Do đó, nghiên cứu này tiến hành khảo sát ảnh hưởng của Na_2SO_4 đối với các xi măng có hàm lượng phụ gia khoáng khác nhau (PCB30 và PCB40), tập trung vào lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết, nhiệt thủy hóa, cường độ nén và độ ổn định thể tích nhằm làm rõ vai trò của Na_2SO_4 trong điều kiện thay đổi thành phần xi măng. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở khoa học giúp sử dụng Na_2SO_4 hiệu quả trong sản xuất xi măng Poóc lăng hỗn hợp ở Việt Nam.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Xi măng Poóc lăng hỗn hợp được sử dụng trong nghiên cứu này là xi măng PCB30 và PCB40 công nghiệp được sản xuất từ một nhà máy xi măng trong nước. Thành phần của các xi măng được trình bày trong Bảng 1. Thành phần hóa học và thành phần khoáng của clanhke được trình bày lần lượt trong Bảng 2 và 3. Natri sunfat (Na_2SO_4) được sử dụng là loại tinh khiết cấp phòng thí nghiệm, với độ tinh khiết $\text{Na}_2\text{SO}_4 \geq 99\%$, được cung cấp dưới dạng sản phẩm thương mại.

Bảng 1. Thành phần của xi măng PCB30 và PCB40.

Xi măng	Tỷ lệ các thành phần (%)					
	Clanhke	Thạch cao	Đá vôi	Đá bazan	Tro đáy	Tro bay
PCB 30	65,5	3,0	9,7	11,0	6,8	4,0
PCB 40	74,5	3,4	8,6	3,2	6,6	3,7

Bảng 2. Thành phần hóa của clanhke xi măng.

Ôxit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Tỷ lệ (%)	21,96	5,53	3,33	65,25	1,92	0,11	0,63	0,39

Bảng 3. Thành phần khoáng của clanhke (tính theo công thức Bogue).

Khoáng	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Tỷ lệ (%)	50,4	27,4	9,0	10,1

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Các mẫu xi măng được chuẩn bị theo các tỉ lệ quy định trong Bảng 4. Natri sulfat được hòa tan hoàn toàn trong nước bằng máy khuấy trong vòng 3 phút nhằm đảm bảo phân tán đồng đều trước khi trộn với xi măng. Dung dịch thu được được sử dụng làm nước trộn để chế tạo hồ xi măng hoặc vữa xi măng (bao gồm xi măng và cát) phục vụ các thí nghiệm tiếp theo.

Bảng 4. Tỷ lệ các thành phần của các mẫu xi măng.

STT	Thành phần (%)	
	Xi măng	Na ₂ SO ₄
1	100	0
2	99	1
3	98	2
4	97	3

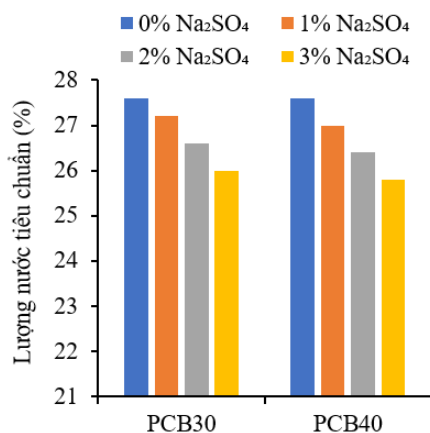
Lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết và độ ổn định thể tích của hồ xi măng được xác định theo TCVN 6017:2011 [18]. Cường độ nén của các mẫu vữa xi măng (mẫu đối chứng và các mẫu có phụ gia) được xác định theo TCVN 6016:2011 [19].

Nhiệt thủy hóa được xác định như sau: hồ xi măng (có và không có phụ gia) được trộn trong 3 phút ở tốc độ chậm bằng máy trộn tiêu chuẩn, sau đó được đổ vào cốc nhựa hình trụ (đường kính 5 cm, chiều cao 4 cm). Mỗi cốc được đặt trong hộp cách nhiệt bằng xốp. Một cảm biến nhiệt được cắm vào giữa mẫu hồ xi măng và nối với thiết bị ghi nhiệt độ. Quá trình ghi nhận nhiệt độ được thực hiện tự động với chu kỳ 30 giây/lần, kéo dài trong 24 giờ.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Lượng nước tiêu chuẩn

Kết quả thí nghiệm xác định lượng nước tiêu chuẩn (LNTC) của các mẫu xi măng thể hiện ở Hình 1.

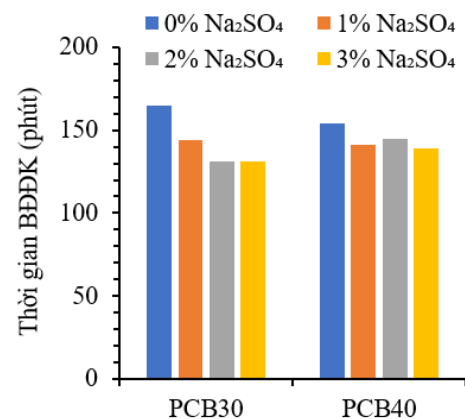


Hình 1. Lượng nước tiêu chuẩn của các mẫu xi măng.

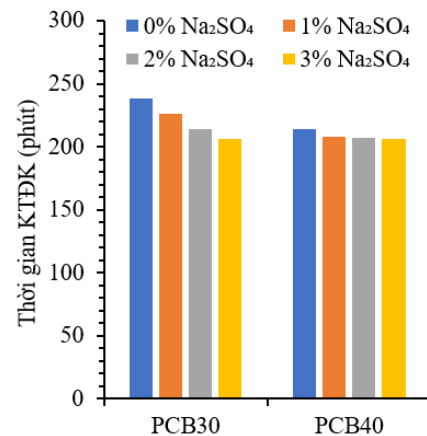
Kết quả trình bày trong Hình 1 cho thấy việc bổ sung Na₂SO₄ làm giảm lượng nước tiêu chuẩn của cả hai loại xi măng nghiên cứu. Kết quả này phù hợp với các phát hiện đã được báo cáo trong các nghiên cứu trước [5, 6, 8, 20]. Sự giảm lượng nước tiêu chuẩn có thể được giải thích bởi sự gia tăng nồng độ các ion Na⁺ và SO₄²⁻ trong dung dịch lỏng do Na₂SO₄ phân ly. Các ion này có thể hấp phụ lên bề mặt các hạt xi măng, làm tăng lực đẩy tĩnh điện giữa các hạt, từ đó làm tăng khả năng phân tán của các hạt xi măng và cải thiện tính lưu động của hồ xi măng.

Kết quả cũng cho thấy sự thay đổi hàm lượng phụ gia khoáng chỉ ảnh hưởng không đáng kể đến mức độ giảm lượng nước tiêu chuẩn do Na₂SO₄ gây ra. Khi hàm lượng Na₂SO₄ tăng từ 0 lên 3 %, lượng nước tiêu chuẩn của xi măng PCB30 giảm 1,6 %, trong khi đối với xi măng PCB40 mức giảm tương ứng là 1,8 %. Mức giảm tương đối tương đồng giữa hai loại xi măng cho thấy ảnh hưởng của Na₂SO₄ đến lượng nước tiêu chuẩn chủ yếu được quyết định bởi sự thay đổi thành phần hóa học của dung dịch lỏng hơn là bởi hàm lượng phụ gia khoáng trong xi măng Poóc lăng hỗn hợp.

3.2. Thời gian đông kết



Hình 2. Thời gian bắt đầu đông kết của các mẫu xi măng.



Hình 3. Thời gian kết thúc đông kết của các mẫu xi măng.

Kết quả thí nghiệm xác định thời gian bắt đầu đông kết (TGBĐDK) và kết thúc đông kết (TGKTDK) của các mẫu xi măng được thể hiện trong các Hình 2 và 3.

Kết quả trình bày trong các Hình 2 và 3 cho thấy việc bổ sung Na_2SO_4 làm giảm cả thời gian bắt đầu đông kết và thời gian kết thúc đông kết của hai loại xi măng nghiên cứu. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, cho thấy vai trò của Na_2SO_4 như một chất thúc đẩy các phản ứng thủy hóa ở giai đoạn đầu [5, 6, 10, 20].

Sự rút ngắn thời gian đông kết khi bổ sung Na_2SO_4 trước hết có thể được giải thích bởi sự thay đổi cân bằng sunfat trong hệ xi măng. Khi hòa tan, Na_2SO_4 cung cấp thêm ion SO_4^{2-} vào dung dịch lỏng, thúc đẩy phản ứng giữa các pha aluminat của clanhke, đặc biệt là C_3A , với canxi và sunfat để hình thành ettringite ở giai đoạn đầu. Sự hình thành nhanh các tinh thể ettringite làm gia tăng tốc độ phát triển cấu trúc không gian của hồ xi măng, dẫn đến sự mất tính dẻo sớm hơn và do đó làm giảm cả thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết. Cơ chế này phù hợp với các kết quả nhiệt thủy hóa thu được trong nghiên cứu, khi việc bổ sung Na_2SO_4 làm tăng cường phản ứng ban đầu và rút ngắn giai đoạn cảm ứng của quá trình thủy hóa.

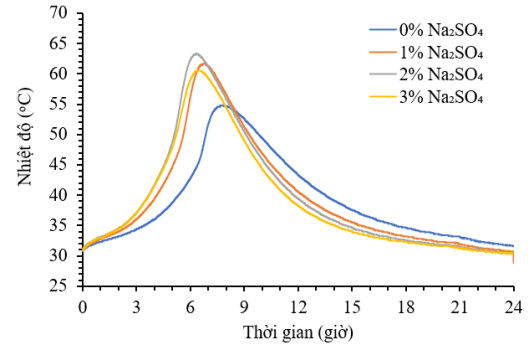
Bên cạnh ảnh hưởng đến phản ứng của pha C_3A , Na_2SO_4 còn làm tăng nồng độ ion kiềm trong dung dịch lỏng, qua đó nâng cao pH của hệ [10]. Môi trường kiềm hơn có thể thúc đẩy sự hòa tan của các pha aluminosilicat hoạt tính trong phụ gia khoáng, làm tăng lượng ion Al và Si tham gia phản ứng ở giai đoạn đầu. Các ion Al hòa tan này có thể tiếp tục tham gia vào quá trình hình thành ettringite, trong khi các ion Si góp phần thúc đẩy sự tạo thành gel C-S-H. Do đó, Na_2SO_4 không chỉ thúc đẩy thủy hóa clanhke mà còn có khả năng làm gia tăng mức độ phản ứng của phụ gia khoáng, góp phần đẩy nhanh quá trình hình thành cấu trúc rắn của hồ xi măng.

Kết quả cũng cho thấy hàm lượng phụ gia khoáng có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả của Na_2SO_4 đối với thời gian đông kết. Khi hàm lượng Na_2SO_4 tăng từ 0 lên 3 %, thời gian bắt đầu đông kết của xi măng PCB30 giảm 34 phút, trong khi mức giảm của PCB40 chỉ đạt 15 phút. Tương tự, thời gian kết thúc đông kết của PCB30 giảm 32 phút, trong khi của PCB40 chỉ giảm 8 phút. Điều này cho thấy xi măng PCB30 thể hiện mức độ đáp ứng mạnh hơn đối với Na_2SO_4 so với PCB40.

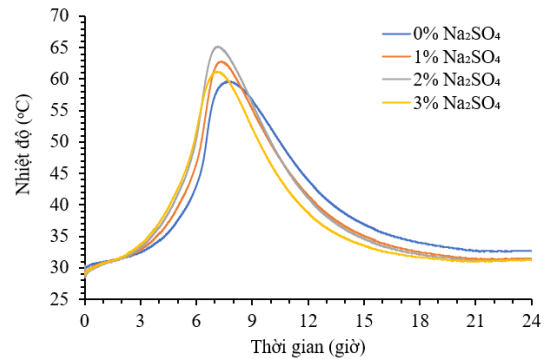
Sự khác biệt này có thể liên quan đến hàm lượng phụ gia khoáng cao hơn và hàm lượng clanhke thấp hơn của PCB30. Trong hệ xi măng chứa nhiều phụ gia khoáng, sự phát triển cấu trúc ở giai đoạn đầu phụ thuộc nhiều hơn vào mức độ phản ứng của các pha aluminosilicat hoạt tính. Việc bổ sung Na_2SO_4 làm tăng độ kiềm của dung dịch lỏng có thể thúc đẩy quá trình hòa tan các cấu tử này, từ đó làm gia tăng lượng sản phẩm hydrat hình thành trong giai đoạn đầu và dẫn đến sự rút ngắn thời gian đông kết rõ rệt hơn.

3.3. Nhiệt thủy hóa

Kết quả thí nghiệm xác định nhiệt thủy hóa của các mẫu xi măng sử dụng hàm lượng Na_2SO_4 khác nhau được thể hiện trong các Hình 4 và 5.



Hình 4. Nhiệt thủy hóa của các mẫu xi măng PCB30.



Hình 5. Nhiệt thủy hóa của các mẫu xi măng PCB40.

Bảng 5. Thời gian xuất hiện và nhiệt độ đỉnh peak của các mẫu xi măng PCB30.

Hàm lượng Na_2SO_4 (%)	0	1	2	3
Thời gian xuất hiện đỉnh peak (giờ)	8,0	6,9	6,5	6,6
Nhiệt độ đỉnh peak (°C)	54,7	61,7	63,1	60,4

Bảng 6. Thời gian xuất hiện và nhiệt độ đỉnh peak của các mẫu xi măng PCB40.

Hàm lượng Na_2SO_4 (%)	0	1	2	3
Thời gian xuất hiện đỉnh peak (giờ)	7,8	7,4	7,2	7,3
Nhiệt độ đỉnh peak (°C)	59,3	62,8	65,1	60,9

Kết quả đường cong tỏa nhiệt thủy hóa trình bày trong các Hình 4 và 5 cho thấy việc bổ sung Na_2SO_4 làm tăng lượng nhiệt tỏa ra trong cả ba giai đoạn chính của quá trình thủy hóa, bao gồm giai đoạn phản ứng ban đầu, giai đoạn cảm ứng (thụ động) và giai đoạn tăng tốc. Đồng thời, thời gian của giai đoạn cảm ứng được rút ngắn và đỉnh tỏa nhiệt chính xuất hiện sớm hơn và cao hơn khi có mặt Na_2SO_4 (như trong các Bảng 5 và 6). Các kết quả này cho thấy Na_2SO_4 có khả năng thúc đẩy các phản ứng thủy hóa ban đầu của xi măng.

Dựa trên các cơ chế đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước, hiệu quả thúc đẩy thủy hóa của Na_2SO_4 có thể liên quan tới khả năng tăng cường đồng thời quá trình thủy hóa của cả các pha C_3A và C_3S [10, 11]. Các ion sunfat do Na_2SO_4 cung cấp thúc đẩy sự hình thành ettringite thông qua phản ứng với các pha aluminat hòa tan ở giai đoạn đầu. Đồng thời, sự gia tăng nồng độ ion kiềm trong dung dịch lỏng do Na_2SO_4 cung cấp làm tăng giá trị pH của hệ, thúc đẩy quá trình hòa

tan các pha silicat và tăng tốc độ tạo thành gel C–S–H và CH [10]. Kết quả là động học thủy hóa của các khoáng clanhke được tăng cường đáng kể, dẫn đến sự xuất hiện sớm hơn và cường độ lớn hơn của các đỉnh tỏa nhiệt.

Bên cạnh việc thúc đẩy thủy hóa clanhke, các nghiên cứu trước cũng cho rằng độ kiềm cao do Na_2SO_4 tạo ra còn có khả năng hoạt hóa các phụ gia khoáng hoạt tính trong giai đoạn đầu [10, 11]. Sự hòa tan mạnh hơn của các pha aluminosilicat vô định hình có trong phụ gia khoáng hoạt tính làm gia tăng nồng độ các cấu tử phản ứng trong dung dịch lỏng, từ đó thúc đẩy các phản ứng puzolan và quá trình hình thành vi cấu trúc. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, trong đó Na_2SO_4 được xác định là một chất hoạt hóa hiệu quả đối với cả quá trình thủy hóa clanhke và phản ứng puzolan trong các hệ xi măng hỗn hợp [20, 21].

Ảnh hưởng của hàm lượng Na_2SO_4 đến quá trình tỏa nhiệt thủy hóa tới cả hai loại xi măng cũng có xu hướng tương tự như kết quả đã được ghi nhận trong nghiên cứu trước [6]. Hiệu quả thúc đẩy thủy hóa tăng dần khi hàm lượng Na_2SO_4 tăng từ 0 đến 2 %, trong khi ở mức 3 % Na_2SO_4 , mức độ gia tăng nhiệt thủy hóa có xu hướng giảm nhẹ. Khi hàm lượng Na_2SO_4 quá cao, nồng độ ion sunfat và kiềm tăng mạnh có thể làm các sản phẩm hydrat kết tủa nhanh trên bề mặt hạt xi măng, tạo thành lớp cản trở sự hòa tan tiếp theo của các khoáng, từ đó làm giảm hiệu quả thúc đẩy thủy hóa.

So sánh giữa hai loại xi măng cho thấy mức độ gia tăng nhiệt thủy hóa do Na_2SO_4 gây ra ở xi măng PCB30 lớn hơn đáng kể so với xi măng PCB40. Kết quả này cho thấy thành phần xi măng có ảnh hưởng đến mức độ đáp ứng của hệ đối với việc bổ sung Na_2SO_4 . Sự khác biệt quan sát được có thể liên quan đến vai trò của phụ gia khoáng trong quá trình thủy hóa ở giai đoạn đầu. Do PCB30 chứa hàm lượng phụ gia khoáng cao hơn và hàm lượng clanhke thấp hơn, quá trình thủy hóa ban đầu của hệ có thể phụ thuộc nhiều hơn vào cơ chế hoạt hóa kiềm. Việc bổ sung Na_2SO_4 có thể làm tăng cường sự hòa tan của các phụ gia khoáng hoạt tính, thúc đẩy các phản ứng puzolan ở giai đoạn sớm và tạo thêm các sản phẩm hydrat. Nhờ đó, hiệu quả thúc đẩy quá trình tỏa nhiệt thủy hóa của Na_2SO_4 ở PCB30 trở nên rõ rệt hơn so với PCB40.

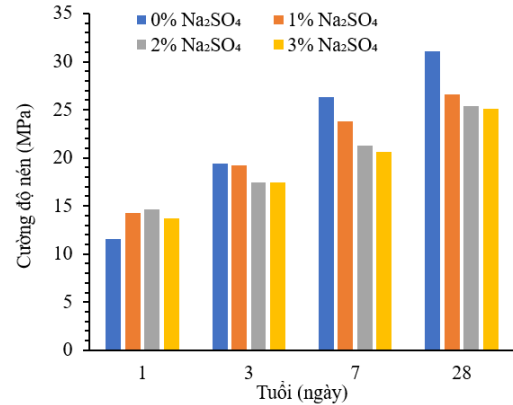
Những kết quả này cho thấy Na_2SO_4 có tiềm năng đối với các hệ xi măng hỗn hợp có hàm lượng clanhke thấp và hàm lượng phụ gia khoáng hoạt tính cao, trong đó quá trình hoạt hóa phụ gia khoáng đóng góp quan trọng vào sự thủy hóa ở tuổi sớm.

3.4. Cường độ nén

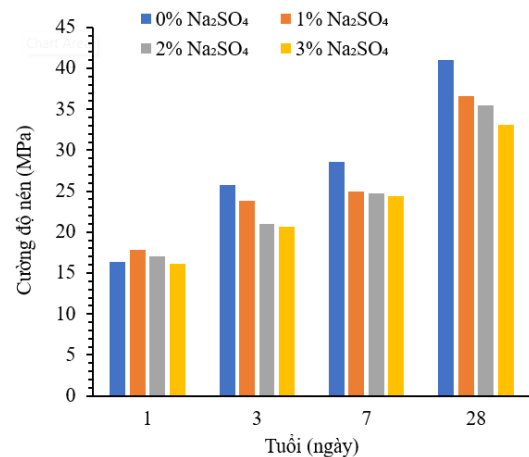
Kết quả xác định cường độ nén của các mẫu vữa ở 1, 3, 7 và 28 ngày được biểu diễn trong các Hình 6 và 7.

Kết quả cường độ nén trong các Hình 6 và 7 cho thấy ảnh hưởng của Na_2SO_4 phụ thuộc đáng kể vào tuổi mẫu và thành phần xi măng. Đối với xi măng PCB30, việc bổ sung Na_2SO_4 làm tăng cường độ nén ở tuổi 1 ngày nhưng làm giảm cường độ ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày. Xu hướng này phù hợp với kết quả đã được công bố trong nghiên cứu

trước, cho thấy Na_2SO_4 chủ yếu thúc đẩy quá trình thủy hóa ở giai đoạn đầu, trong khi suy giảm sự phát triển cường độ ở tuổi muộn.



Hình 6. Cường độ nén các mẫu vữa xi măng PCB30.



Hình 7. Cường độ nén các mẫu vữa xi măng PCB40.

Sự gia tăng cường độ ở tuổi 1 ngày có thể được giải thích bởi khả năng tăng tốc các phản ứng thủy hóa ban đầu của Na_2SO_4 . Như đã thảo luận ở trên, Na_2SO_4 làm tăng độ kiềm của dung dịch lỏng và thúc đẩy sự hòa tan của các pha clanhke cũng như các phụ gia khoáng hoạt tính, từ đó đẩy nhanh quá trình hình thành ettringite và gel C–S–H trong giai đoạn đầu. Sự phát triển nhanh hơn của vi cấu trúc giúp cải thiện cường độ nén tuổi sớm. Tuy nhiên, ở các tuổi muộn hơn, sự tăng tốc quá mức của quá trình thủy hóa ban đầu có thể dẫn đến sự hình thành vi cấu trúc kém đồng nhất hơn và làm suy giảm sự phát triển cường độ dài hạn.

Đối với xi măng PCB40, cường độ nén ở tuổi 1 ngày tăng khi hàm lượng Na_2SO_4 tăng đến 2 %, nhưng giảm khi hàm lượng Na_2SO_4 đạt 3 %. Kết quả này cho thấy việc bổ sung Na_2SO_4 ở mức vừa phải có tác dụng thúc đẩy hiệu quả quá trình thủy hóa ban đầu, trong khi hàm lượng quá cao lại gây ảnh hưởng bất lợi đến sự phát triển cường độ. Một nguyên nhân có thể là độ kiềm quá cao do Na_2SO_4 tạo ra đã làm cản trở quá trình thủy hóa của C_3A và sự hình thành ettringite [10, 21].

Ngược lại, đối với xi măng PCB30 chứa hàm lượng phụ gia khoáng hoạt tính cao hơn, cường độ nén tuổi 1 ngày ở mức 3 % Na_2SO_4 không có xu hướng suy giảm tương tự. Kết quả này cho thấy tác dụng hoạt hóa phụ gia khoáng của Na_2SO_4 có thể bù đắp một phần các ảnh hưởng bất lợi do hàm lượng sunfat cao gây ra. Việc tăng cường hòa tan và hoạt tính puzolan ở giai đoạn đầu của phụ gia khoáng có thể tạo thêm các sản phẩm hydrat, giúp duy trì cường độ tuổi sớm ngay cả khi hàm lượng Na_2SO_4 đạt mức cao.

Đối với cả hai loại xi măng PCB30 và PCB40, cường độ nén ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày nhìn chung đều giảm khi bổ sung Na_2SO_4 . Tuy nhiên, mức độ suy giảm cường độ có sự khác biệt giữa hai hệ xi măng. Ở tuổi 3 ngày, khi tăng hàm lượng Na_2SO_4 từ 0 % đến 3 %, mức suy giảm cường độ của PCB30 (giảm 2 MPa) thấp hơn đáng kể so với PCB40 (giảm 5,1 MPa). Điều này cho thấy Na_2SO_4 gây ảnh hưởng bất lợi ít hơn đối với các hệ xi măng chứa hàm lượng phụ gia khoáng cao. Một nguyên nhân có thể là hàm lượng clanhke thấp hơn trong PCB30 đồng nghĩa với hàm lượng C_3A thấp hơn, từ đó hạn chế sự hình thành quá mức ettringite trong quá trình thủy hóa. Do đó, các tác động bất lợi liên quan đến mất cân bằng sunfat và sự kết tủa nhanh các sản phẩm hydrat trở nên ít nghiêm trọng hơn trong hệ xi măng chứa nhiều phụ gia khoáng.

Ở các tuổi 7 và 28 ngày, mức độ suy giảm cường độ của PCB30 và PCB40 nhìn chung trở nên tương đương nhau. Tuy nhiên, tại hàm lượng Na_2SO_4 cao nhất (3 %), PCB30 vẫn cho mức suy giảm cường độ thấp hơn so với PCB40. Kết quả cho thấy hiệu quả tích cực của Na_2SO_4 được phát huy rõ hơn trong các hệ xi măng chứa hàm lượng phụ gia khoáng hoạt tính cao. Một giả thuyết có thể được đưa ra là sự gia tăng độ kiềm của dung dịch lỗ rỗng do Na_2SO_4 tạo ra đã góp phần thúc đẩy mức độ phản ứng của phụ gia khoáng ở giai đoạn đầu, từ đó bù đắp một phần các ảnh hưởng bất lợi liên quan đến việc bổ sung sunfat ở hàm lượng cao.

Nhìn chung, các kết quả thu được cho thấy Na_2SO_4 có tiềm năng như một chất hoạt hóa trong các xi măng Poóc lăng hỗn hợp hàm lượng clanhke thấp và chứa nhiều phụ gia khoáng hoạt tính. Quá trình hoạt hóa phụ gia khoáng đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện tính năng tuổi sớm và giảm thiểu các ảnh hưởng bất lợi của Na_2SO_4 đối với sự phát triển cường độ ở tuổi muộn.

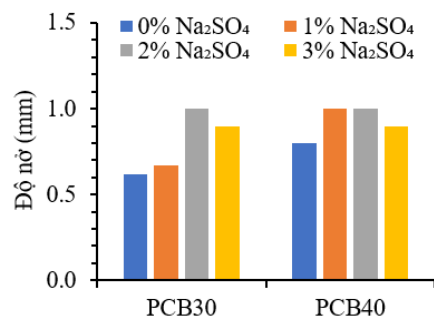
3.5. Độ ổn định thể tích Le Chatelier

Kết quả thí nghiệm xác định độ ổn định thể tích Le Chatelier của các mẫu xi măng được thể hiện trong Hình 8.

Kết quả xác định độ ổn định thể tích cho thấy tất cả các mẫu xi măng đều có giá trị độ nở rất thấp, không lớn hơn 1 mm. Kết quả này cho thấy việc bổ sung Na_2SO_4 không gây ra hiện tượng mất ổn định thể tích đáng kể đối với cả hai hệ xi măng nghiên cứu và tất cả các mẫu đều duy trì được độ ổn định thể tích ở mức chấp nhận được.

Mặc dù tất cả các mẫu đều có độ nở thấp, kết quả cho thấy độ nở có xu hướng tăng nhẹ khi tăng hàm lượng Na_2SO_4 . Hiện tượng này có thể liên quan đến sự gia tăng nồng độ ion SO_4^{2-} trong dung dịch lỗ rỗng, từ đó thúc đẩy phản ứng của các pha aluminat và làm tăng lượng

ettringite hình thành trong giai đoạn đầu thủy hóa. Do ettringite có thể tích lớn hơn các pha phản ứng ban đầu nên sự gia tăng lượng ettringite có thể dẫn đến xu hướng tăng nhẹ độ nở của hồ xi măng.



Hình 8. Độ ổn định thể tích Le Chatelier của các mẫu xi măng.

Nhìn chung, các mẫu PCB30 có giá trị độ nở tương đương hoặc thấp hơn nhẹ so với các mẫu PCB40 ở cùng hàm lượng Na_2SO_4 . Điều này cho thấy sự thay đổi hàm lượng phụ gia khoáng không ảnh hưởng đáng kể đến tác động của Na_2SO_4 đối với độ ổn định thể tích của xi măng.

Giá trị độ nở thấp của tất cả các mẫu cho thấy lượng ion sunfat được đưa vào hệ thống qua Na_2SO_4 chưa đủ lớn để gây ra các phản ứng trương nở có hại trong điều kiện nghiên cứu. Sự có mặt của phụ gia khoáng có thể góp phần làm mịn cấu trúc lỗ rỗng và tạo điều kiện thuận lợi cho sự phân bố các sản phẩm hydrat trong vi cấu trúc, qua đó hạn chế biến dạng thể tích của hệ vật liệu.

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- Na_2SO_4 làm giảm lượng nước tiêu chuẩn của tất cả các loại xi măng nghiên cứu. Hàm lượng phụ gia khoáng chỉ ảnh hưởng không đáng kể đến mức độ giảm lượng nước tiêu chuẩn do Na_2SO_4 gây ra.
- Na_2SO_4 làm rút ngắn thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết, đồng thời làm tăng nhiệt thủy hóa và dịch chuyển đỉnh tỏa nhiệt chính về thời điểm sớm hơn. Các hiệu ứng này biểu hiện rõ hơn đối với xi măng có hàm lượng phụ gia khoáng cao hơn. Điều này có thể liên quan tới việc Na_2SO_4 có khả năng hoạt hóa các phụ gia khoáng hoạt tính trong giai đoạn thủy hóa ban đầu.
- Na_2SO_4 làm tăng cường độ ở tuổi 1 ngày nhưng nhìn chung làm giảm cường độ ở các tuổi muộn hơn. Mức độ tăng cường độ tuổi sớm rõ rệt hơn ở xi măng có hàm lượng phụ gia khoáng cao hơn, trong khi mức độ suy giảm cường độ tuổi muộn thấp hơn, đặc biệt ở hàm lượng Na_2SO_4 cao. Kết quả này cho thấy Na_2SO_4 phát huy hiệu quả tốt hơn và gây ảnh hưởng bất lợi ít hơn đối với các hệ xi măng chứa nhiều phụ gia khoáng hoạt tính.
- Việc bổ sung Na_2SO_4 không gây ảnh hưởng đáng kể đến độ ổn định thể tích của xi măng với hàm lượng phụ gia khoáng khác nhau. Nhìn chung, Na_2SO_4 cho thấy tiềm năng lớn như một chất hoạt hóa hóa học đối với các hệ xi măng Poóc lăng hỗn hợp hàm lượng clanhke thấp

và chứa nhiều phụ gia khoáng hoạt tính, nhờ khả năng thúc đẩy quá trình thủy hóa và cải thiện cường độ nền tuổi sớm của xi măng.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Scrivener K. L., John V. M., Gartner E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based economy. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 114:2-26.
- [2]. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 41:1244-1256.
- [3]. Tsivilis S., Chaniotakis E., Kakali G., Batis G. (2002). An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete, *Cement and Concrete Composite*, Elsevier, 24:371-378.
- [4]. You K.S., Cho J.S., Ahn J.W., Han G.C. (2006). Hydration behavior of blast furnace slag activated by Na₂SO₄ and fineness of slag. *Resources Processing*, 53:23-28.
- [5]. Joseph S., Snellings R., Cizer O. (2019). Activation of Portland cement blended with high volume of fly ash using Na₂SO₄. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 104:103417.
- [6]. Nguyễn D. Đ., Hoàng T. L. (2025). Nghiên cứu ảnh hưởng của natri sulfat tới một số tính chất của xi măng poóc lăng hỗn hợp. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, 15(4): 83-87.
- [7]. Neto J. S. A., De la Torre A. G., Kirchheim A. P. (2021). Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 279:122428.
- [8]. Singh N., Rai. S, Singh N.B. (2001). Effect of sodium sulphate on the hydration of granulated blast furnace slag blended portland cement. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, NISCAIR-CSIR, 8:110-113.
- [9]. Nguyễn T. Đ. K., Bùi P. T., Nguyễn N. T. (2022). Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng chất hoạt hóa natri sulat đến cường độ chịu nén của chất kết dính có sử dụng hàm lượng lớn tro bay. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, 12(5):25-30.
- [10]. Donatello S., Fernandez-Jimenez A., Palomo A. (2013). Very high volume fly ash cements. Early age hydration study using Na₂SO₄ as an activator. *Journal of the American Ceramic Society*. 96(3):900-906.
- [11]. Joseph S., Cizer O. (2020). Hydration of hybrid cements at low temperatures a study on portland cement-blast furnace slag - Na₂SO₄. *Materials*, 15(5):1914.
- [12]. Duan S., Li L., Wang Z., Wang G., Zhou Z., Zhang J. (2025). Sodium sulfate promotes alkali-activated steel slag and granulated blast furnace slag: Engineering performance and micro-mechanism. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 494:143484.
- [13]. Etcheverry J. M., Villagran-Zaccardi Y. A., Heede P. V., Hallet V., Belie N. D. (2023). Effect of sodium sulfate activation on the early age behaviour and microstructure development of hybrid cementitious systems containing Portland cement, and blast furnace slag, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 141:105101.
- [14]. Etcheverry J. M. et al (2023) Phase evolution of hybrid alkali sulfate-activated ground-granulated blast furnace slag cements, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11:17519 – 17531.
- [15]. Rashad A. M., Bai Y., Basheer P. A. M., Milestone N. B., Collier N.C. (2013). Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. *Cement & Concrete Composites*, Elsevier, 37:20-29.
- [16]. Shi C., Day R. L. (1995). Acceleration of the reactivity of fly ash by chemical activation. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 25(1):15-21.
- [17]. Bui P. T., Ogawa, Yuko O., Kenji 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.
- [18]. TCVN 6017:2011. *Xi măng – Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [19]. TCVN 6016:2011. *Xi măng – Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [20]. Kumar M., Singh N.P., Singh S.K., Singh N.B. (2010), Combined effect of sodium sulphate and superplasticizer on the hydration of fly ash blended portland cement. *Materials Research*, 13(2):177-183.
- [21]. Fu J. et al (2020). Mechanisms of enhancement in early hydration by sodium sulfate in a slag cement blend – Insights from pore solution chemistry. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 135:106110.