

Nghiên cứu ảnh hưởng của natri sulfat tới một số tính chất của xi măng poóc lăng hỗn hợp

Nguyễn Dương Định^{1*}, Hoàng Trung Lực¹

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

TỪ KHOÁ

Natri sulfat
Xi măng Poóc lăng hỗn hợp
Cường độ nén
Nhiệt thủy hóa
Tính chất

TÓM TẮT

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng natri sulfat (Na_2SO_4) đến một số tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Hàm lượng Na_2SO_4 được khảo sát trong khoảng từ 0% đến 3%. Các tính chất được xem xét 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 nghiên cứu cho thấy việc tăng hàm lượng Na_2SO_4 từ 0% đến 3% làm giảm lượng nước tiêu chuẩn khoảng 3%, rút ngắn thời gian bắt đầu đông kết 40 phút và thời gian kết thúc đông kết 60 phút. Việc bổ sung Na_2SO_4 thúc đẩy quá trình thủy hóa của xi măng trong giai đoạn sớm. Ở tuổi 1 ngày, Na_2SO_4 làm tăng đáng kể cường độ nén, với mức tăng khoảng 32% khi sử dụng 1% và 2% Na_2SO_4 , và tăng 24% khi sử dụng 3% Na_2SO_4 . Tuy nhiên, ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày, cường độ nén giảm, trong đó mẫu sử dụng 1% Na_2SO_4 cho mức giảm thấp hơn so với các mẫu sử dụng 2% và 3%. Ngoài ra, Na_2SO_4 làm tăng độ nở thể tích, với mức tăng lớn nhất là 0,4 mm so với mẫu đối chứng. Trong số các hàm lượng Na_2SO_4 được khảo sát, hàm lượng 1% được xem là tối ưu, do vừa cải thiện đáng kể cường độ ở tuổi 1 ngày, vừa hạn chế sự suy giảm cường độ ở các tuổi sau so với các hàm lượng cao hơn.

KEYWORDS

Sodium sulfate
Blended Portland cement
Compressive strength
Heat of hydration
Properties

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the effect of sodium sulfate (Na_2SO_4) content on certain properties of blended Portland cement. The Na_2SO_4 content was varied from 0% to 3%. The investigated properties include water of consistency, setting time, heat of hydration during the first 24 hours, compressive strength at 1, 3, 7, and 28 days, and soundness. The results show that increasing the Na_2SO_4 content from 0% to 3% reduces the water of consistency by approximately 3%, shortens the initial setting time by 40 minutes, and reduces the final setting time by 60 minutes. The addition of Na_2SO_4 accelerates cement hydration at early ages. At 1 day, Na_2SO_4 significantly increases compressive strength, with an increase of approximately 32% at 1% and 2% Na_2SO_4 , and 24% at 3% Na_2SO_4 . However, compressive strength decreases at 3, 7, and 28 days, with the 1% Na_2SO_4 sample showing a smaller reduction compared to those with 2% and 3%. Moreover, Na_2SO_4 increases expansion, with the highest observed increase being 0.4 mm compared to the control sample. Among the Na_2SO_4 dosages studied, 1% is considered optimal as it significantly enhances early-age strength while minimizing the reduction in long-term strength relative to higher dosages.

1. Giới thiệu

Ngành công nghiệp xi măng thải ra một lượng lớn khí CO_2 mỗi năm, góp phần đáng kể vào ô nhiễm môi trường [1, 2]. Trung bình, quá trình sản xuất xi măng tạo ra khoảng 0,7 đến 1,1 tấn CO_2 cho mỗi tấn xi măng [3], trong đó giai đoạn sản xuất clanhke là nguồn phát thải lớn nhất. Để giảm thiểu tác động môi trường, một trong những giải pháp phổ biến là sử dụng phụ gia khoáng nhằm giảm hàm lượng clanhke trong xi măng [4, 5].

Phụ gia khoáng được chia thành hai nhóm: phụ gia đầy và phụ gia khoáng hoạt tính. Trong đó, phụ gia khoáng hoạt tính thường được sử dụng với tỷ lệ lớn hơn đáng kể. Phụ gia đầy phổ biến là đá vôi tự

nhiên, được khai thác từ các mỏ gần nhà máy xi măng. Tại Việt Nam, các phụ gia khoáng hoạt tính thường được sử dụng gồm đá bazan, tro bay, tro đáy và xi hạt lò cao. Đá bazan là khoáng hoạt tính có nguồn gốc tự nhiên; trong khi đó, tro bay và tro đáy là sản phẩm phụ từ quá trình đốt than tại các nhà máy nhiệt điện, còn xi hạt lò cao là sản phẩm phụ của ngành luyện gang thép.

Các phụ gia khoáng hoạt tính chứa thành phần hoạt tính chủ yếu là SiO_2 và Al_2O_3 . Trong quá trình thủy hóa xi măng, các khoáng này thể hiện tính puzolan thông qua phản ứng của SiO_2 và Al_2O_3 với Ca(OH)_2 sinh ra từ thủy hóa xi măng Poóc lăng, tạo thành các sản phẩm C-S-H và C-A-H [6]. Nhờ đó, việc bổ sung phụ gia khoáng hoạt tính có thể

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

Nhận ngày 26/05/2025, sửa xong ngày 15/07/2025, chấp nhận đăng ngày 16/07/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.1009>

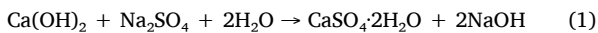
làm giảm độ rỗng của đá xi măng và cải thiện vùng tiếp xúc giữa hồ xi măng và cốt liệu [7, 8].

Việc sử dụng phụ gia khoáng giúp cải thiện nhiều tính chất quan trọng của xi măng và bê tông, bao gồm: tăng cường độ tuổi muộn, nâng cao khả năng kháng sunfat, giảm nhiệt thủy hóa, giảm phản ứng kiềm–cốt liệu và hạn chế sự xâm nhập của ion clo [9–11]. Bên cạnh hiệu quả kỹ thuật, việc tận dụng tro xỉ và xi lò cao còn mang lại lợi ích kinh tế và góp phần giảm thiểu tác hại môi trường từ các sản phẩm phụ công nghiệp [10, 11].

Tuy nhiên, một nhược điểm quan trọng của các phụ gia khoáng này là làm giảm cường độ ở tuổi sớm do hoạt tính thấp hơn so với xi măng Poóc lăng [11]. Điều này giới hạn hàm lượng có thể sử dụng trong chế tạo xi măng. Nhược điểm này có thể được khắc phục thông qua các biện pháp hoạt hóa cơ học hoặc hóa học [11]. Nghiền mịn phụ gia khoáng có thể nâng cao hoạt tính nhưng đi kèm với chi phí năng lượng cao [12]. Ngoài ra, việc nghiền tro bay còn làm mất hiệu ứng "ô bi" có lợi trong quá trình thi công. Do đó, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào sử dụng phụ gia hóa học để hoạt hóa tro xỉ và xi lò cao [13, 14].

Trong số các chất hoạt hóa, NaOH được chứng minh là rất hiệu quả. Tuy nhiên, do tính kiềm mạnh, NaOH gây nguy hiểm cho sức khỏe và khó khăn trong quá trình thi công [15]. Gần đây, một số nghiên cứu đã đề xuất sử dụng natri sulfat (Na_2SO_4) làm phụ gia hoạt hóa cho xi măng chứa tro bay và xi lò cao [10–12, 15–18]. Na_2SO_4 là một muối trung tính, rẻ tiền và an toàn khi sử dụng. Việc bổ sung Na_2SO_4 có thể làm giảm lượng nước tiêu chuẩn, rút ngắn thời gian đông kết và tăng cường độ ở tuổi sớm của xi măng chứa phụ gia khoáng.

Những ảnh hưởng này có liên quan đến quá trình thủy hóa của xi măng. Na_2SO_4 phản ứng với $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tạo thành thạch cao ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), theo phản ứng (1), và từ đó hình thành ettringite thông qua phản ứng với C_3A [15, 18].



Na_2SO_4 cũng thúc đẩy thủy hóa C_3S bằng cách tăng độ hòa tan của C_3S trong nước, qua đó thúc đẩy hình thành các sản phẩm C–S–H và $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [15]. Đồng thời, nó kích thích phản ứng pozolan của tro

bay và xi lò cao, làm tăng lượng C–S–H và giảm lượng $\text{Ca}(\text{OH})_2$ trong cấu trúc đá xi măng [15, 18].

Tuy nhiên, ảnh hưởng của Na_2SO_4 đến cường độ ở tuổi muộn của xi măng chứa tro bay và xi lò cao vẫn chưa thống nhất. Một số nghiên cứu cho thấy cường độ tăng, trong khi một số khác lại ghi nhận xu hướng suy giảm [10, 12, 17, 19]. Hiệu quả của Na_2SO_4 phụ thuộc vào nồng độ sử dụng, cũng như loại và hàm lượng phụ gia khoáng trong xi măng [11, 12].

Hiện chưa có nghiên cứu nào tập trung vào ảnh hưởng của Na_2SO_4 đối với quá trình thủy hóa và tính chất của xi măng hỗn hợp có sử dụng đồng thời nhiều loại phụ gia khoáng. Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng Na_2SO_4 đến một số tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Hàm lượng Na_2SO_4 được khảo sát trong khoảng từ 0 % đến 3 %. Phạm vi hàm lượng Na_2SO_4 được khảo sát từ 0 % đến 3 %, dựa trên tổng hợp các nghiên cứu trước đây với hàm lượng sử dụng khác nhau, trong đó một số nghiên cứu sử dụng hàm lượng lên đến 4 % [10–12, 15, 17, 19]. Tuy nhiên, theo TCVN 6260:2020, hàm lượng SO_3 tối đa cho phép trong xi măng là 3,5 %, nên mức 3 % được chọn nhằm đảm bảo an toàn sử dụng trong thực tế công nghiệp. Các tính chất được nghiên cứu bao gồm: lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết, nhiệt thủy hóa trong 24 giờ đầu, cường độ nén tại các tuổi 1, 3, 7 và 28 ngày, và độ nở thể tích.

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 loại xi măng PCB30 công nghiệp được sản xuất trong nước. Thành phần hóa học của 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 sulfat (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.

Thành phần	Clanhke	Thạch cao	Tro bay	Đá đen	Đá phi nguyên liệu	Tro đáy	Xi lò cao
Tỷ lệ (%)	51,63	1,37	5	12	6	18	6

Bảng 2. Thành phần hóa của clanhke xi măng.

Oxit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Tỷ lệ (%)	21,67	5,32	3,43	65,36	2,92	0,07	0,98	0,38

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

Khoáng	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Tỷ lệ (%)	57,00	19,16	8,30	10,42

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.

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

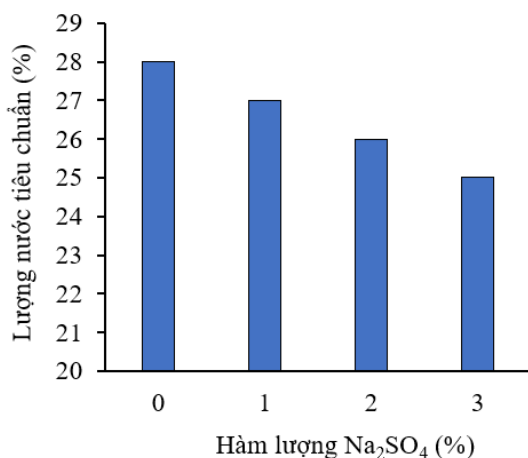
Lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết và độ ổn định thể tích của hồ xi măng được xác định theo TCVN 6017:2011 [20]. Cường độ nén của các mẫu vữa xi măng (mẫu đối chứng và các mẫu có phụ gia) được xác định theo TCVN 6016:2011 [21], các mẫu được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn đến các ngày tuổi 1, 3, 7 và 28 ngày trước khi đo cường độ nén.

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.



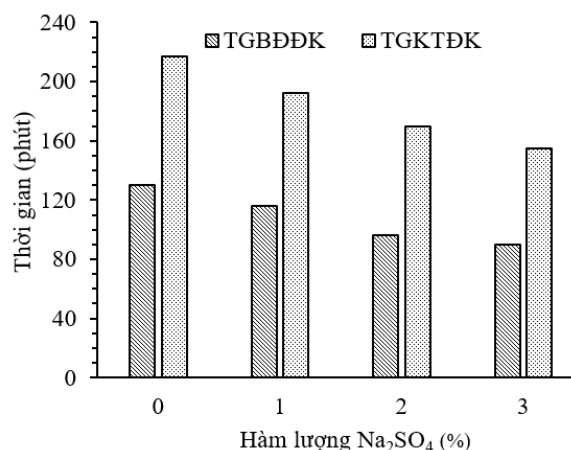
Hình 1. Lượng nước tiêu chuẩn của các mẫu xi măng.

Kết quả thể hiện trong Hình 1 cho thấy LNTC của các mẫu sử dụng Na₂SO₄ đều thấp hơn so với mẫu đối chứng, và LNTC tiếp tục giảm khi hàm lượng Na₂SO₄ tăng. Tác dụng giảm nước của Na₂SO₄ phù hợp với các kết quả đã công bố trước đây của Singh và cộng sự [10], Joseph và cộng sự [12], Kumar và cộng sự [19], khi các tác giả này cũng ghi nhận rằng việc bổ sung Na₂SO₄ giúp giảm nhu cầu nước hồ xi măng và cải thiện tính công tác của vữa xi măng.

Hiện tượng này có thể được giải thích như sau: khi được thêm vào hệ, Na₂SO₄ phân ly thành các ion Na⁺ và SO₄²⁻ trong dung dịch loãng. Các ion này có khả năng hấp phụ lên bề mặt các hạt xi măng, từ đó làm tăng lực đẩy tĩnh điện giữa các hạt. Cơ chế này giúp hạn chế hiện tượng kết tụ giữa các hạt xi măng, dẫn đến việc giảm lượng nước cần thiết để duy trì sự linh động của hồ xi măng.

3.2. Thời gian đông kết

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



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

Kết quả cho thấy cả TGBĐĐK và TGKTĐK của các mẫu có sử dụng Na₂SO₄ đều thấp hơn so với mẫu đối chứng. Khi hàm lượng Na₂SO₄ tăng từ 0 % lên 3 %, TGBĐĐK giảm từ 130 phút xuống còn 90 phút, trong khi TGKTĐK giảm từ 215 phút xuống còn 155 phút. Mặc dù thời gian đông kết giảm, tất cả các mẫu vẫn đáp ứng yêu cầu quy định trong TCVN 6260:2020 [22]. Việc sử dụng Na₂SO₄ làm giảm thời gian đông kết của xi măng phù hợp với kết quả nghiên cứu khác đã công bố [10, 15, 19].

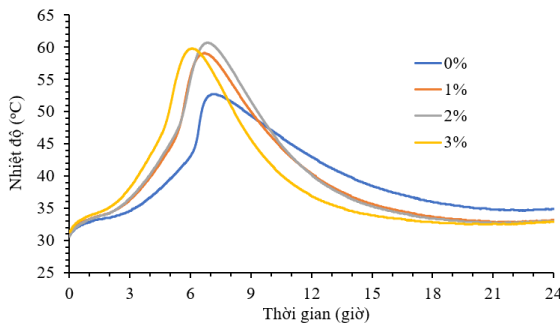
Sự rút ngắn thời gian đông kết này được cho là do Na₂SO₄ thúc đẩy quá trình thủy hóa sớm của C₃S [15, 17]. Cụ thể, ion SO₄²⁻ có vai trò thúc đẩy sự hòa tan ban đầu của C₃S, làm tăng nồng độ các ion Ca²⁺, OH⁻ và SiO₃²⁻ trong dung dịch loãng, từ đó thúc đẩy sự hình thành sớm của các sản phẩm thủy hóa như C-S-H và CH. Quá trình này dẫn đến sự phát triển nhanh của cấu trúc gel và thúc đẩy quá trình đông kết.

Ngoài ra, việc Na₂SO₄ làm giảm lượng nước tiêu chuẩn cũng góp phần làm rút ngắn thời gian đông kết. Khi lượng nước nhào trộn giảm,

dung dịch dễ đạt trạng thái bão hòa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hơn, dẫn đến sự kết tinh sớm của CH và phá vỡ nhanh hơn lớp màng C-S-H thụ động bao quanh hạt xi măng, từ đó đẩy nhanh quá trình đông kết [23].

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 Hình 3.



Hình 3. Nhiệt thủy hóa của các mẫu xi măng.

Kết quả trong Hình 3 cho thấy, khi hàm lượng Na_2SO_4 tăng từ 0 % đến 3 %, nhiệt độ của hồ xi măng tăng lên trong cả ba giai đoạn: phản ứng ban đầu, giai đoạn thụ động và giai đoạn tăng tốc. Đồng thời, thời gian của giai đoạn thụ động bị rút ngắn và vị trí của đỉnh nhiệt dịch chuyển về thời điểm sớm hơn. Những tác động này của Na_2SO_4 tương đồng với kết quả nhiệt thủy hóa trong nghiên cứu của Joseph và cộng sự [19].

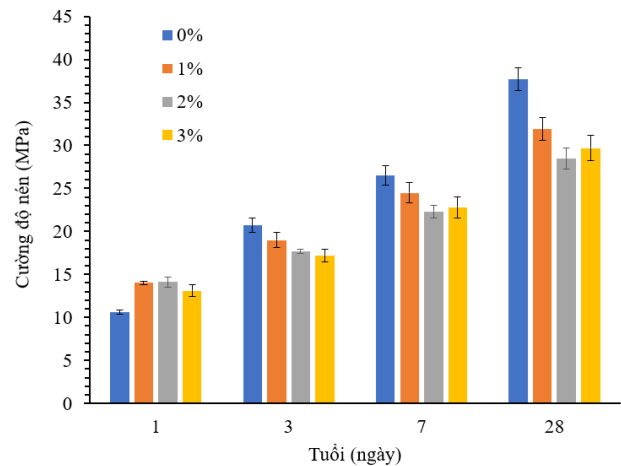
Điều này chứng tỏ rằng việc bổ sung Na_2SO_4 đã thúc đẩy quá trình thủy hóa sớm của xi măng [15, 17]. Cụ thể, Na_2SO_4 kích thích thủy hóa của cả C_3A và C_3S , đồng thời hoạt hóa các phụ gia khoáng có hoạt tính puzolan trong giai đoạn đầu. Na_2SO_4 thúc đẩy sự hình thành ettringite (thông qua phản ứng giữa C_3A và $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), nhờ khả năng làm giảm rào cản năng lượng của quá trình tạo ettringite [17]. Sự hình thành ettringite nhanh chóng làm giảm nồng độ ion Al^{3+} trong dung dịch lỏng rỗng, từ đó gián tiếp thúc đẩy thủy hóa của C_3S .

Quá trình thủy hóa của C_3A và C_3S được tăng cường góp phần làm giảm nồng độ các ion Ca^{2+} , Al^{3+} và SiO_3^{2-} trong dung dịch, đồng thời làm tăng pH của hệ. Môi trường kiềm cao này giúp tăng cường độ hòa tan của các phụ gia khoáng hoạt tính, từ đó nâng cao hoạt tính puzolan của chúng trong giai đoạn sớm.

Ngoài ra, Hình 3 cũng cho thấy giá trị đỉnh nhiệt thủy hóa có xu hướng tăng khi hàm lượng Na_2SO_4 tăng từ 0 % đến 2 %, nhưng giảm nhẹ khi tăng lên 3 %. Một số nghiên cứu cho thấy rằng việc bổ sung quá mức Na_2SO_4 có thể làm tăng đáng kể pH trong hệ, từ đó ức chế quá trình hydrat hóa của C_3A và cản trở sự hình thành ettringite [15, 17].

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 Hình 4.



Hình 4. Cường độ nén các mẫu vữa xi măng.

Kết quả trong Hình 4 cho thấy việc bổ sung Na_2SO_4 làm tăng đáng kể cường độ nén của xi măng ở tuổi 1 ngày so với mẫu đối chứng. Các mẫu chứa 1 % và 2 % Na_2SO_4 đạt mức tăng cường độ tương đương, khoảng 32 %, trong khi mẫu chứa 3 % Na_2SO_4 có mức tăng thấp hơn, khoảng 24 %. Kết quả này phù hợp với xu hướng tăng nhiệt thủy hóa đã quan sát trong mục 3.3, cho thấy rằng Na_2SO_4 đã thúc đẩy quá trình thủy hóa của C_3A và C_3S cũng như hoạt hóa các phụ gia khoáng hoạt tính ở giai đoạn đầu.

Tuy nhiên, cũng theo Hình 4, việc bổ sung Na_2SO_4 dẫn đến sự suy giảm đáng kể cường độ nén ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày. Trong ba hàm lượng Na_2SO_4 được khảo sát, mẫu chứa 1 % Na_2SO_4 thể hiện mức suy giảm cường độ thấp nhất, trong khi hai mẫu chứa 2 % và 3 % Na_2SO_4 có mức suy giảm tương đương và rõ rệt hơn. Việc Na_2SO_4 làm tăng cường độ tuổi sớm và làm giảm cường độ tuổi muộn này cũng được ghi nhận trong nghiên cứu của Fu và cộng sự khi nghiên cứu trên xi măng xi lò cao [17].

Nguyên nhân của sự suy giảm này có thể liên quan đến sự hình thành ettringite với hàm lượng lớn ở giai đoạn đầu, thậm chí có thể dẫn tới hình thành ettringite muộn. Quá trình này gây gia tăng thể tích nội tại và tạo ứng suất trong cấu trúc đá xi măng. Bên cạnh đó, việc tăng tốc phản ứng thủy hóa của C_3S và hoạt hóa puzolan có thể tạo ra một lượng lớn sản phẩm thủy hóa nhưng với cấu trúc vi mô xốp hơn, dẫn đến sự suy giảm về mặt cơ học ở tuổi muộn [24]. Để giảm thiểu ảnh hưởng xấu của Na_2SO_4 đến cường độ nén tuổi muộn của xi măng, cần sử dụng nó ở hàm lượng phù hợp. Dựa trên kết quả cường độ, ta thấy hàm lượng 1 % được xem là tối ưu vì nó vừa tăng đáng kể cường độ ở tuổi 1 ngày, vừa có mức suy giảm cường độ ở các tuổi sau thấp hơn so với các hàm lượng 2 % và 3 %.

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 Bảng 5.

Bảng 5. Độ ổn định thể tích Le Chatelier của các mẫu xi măng.

STT	Hàm lượng Na_2SO_4 (%)	Độ nở (mm)
1	0	0,38
2	1	0,58
3	2	0,78
4	3	0,50

Kết quả trong Bảng 5 cho thấy các mẫu có sử dụng Na_2SO_4 đều có độ nở cao hơn so với mẫu đối chứng. Tuy nhiên, tất cả các mẫu vẫn đáp ứng yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 6260:2020 [22], với giá trị độ nở nhỏ hơn 10 mm. Sự gia tăng độ nở này có thể là do sự hình thành ettringite với hàm lượng lớn hơn trong đá xi măng khi có mặt của Na_2SO_4 .

4. Kết luận

Dựa trên kết quả nghiên cứu, việc bổ sung Na_2SO_4 với các hàm lượng 1 %, 2 % và 3 % cho thấy những ảnh hưởng rõ rệt đến tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Cụ thể:

- Na_2SO_4 làm giảm lượng nước tiêu chuẩn (lên tới 3%) và rút ngắn đáng kể thời gian đông kết, trong khi vẫn đáp ứng yêu cầu của TCVN 6260:2020.
- Phụ gia này thúc đẩy quá trình thủy hóa sớm và làm tăng cường độ nén ở 1 ngày tuổi.
- Tuy nhiên, cường độ nén ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày có xu hướng giảm, đặc biệt với hàm lượng 2 % và 3 %.
- Na_2SO_4 cũng làm tăng độ nở thể tích nhưng vẫn trong giới hạn cho phép trong TCVN 6260:2020.

Trong các mức khảo sát, hàm lượng 1 % được đánh giá là tối ưu do đạt hiệu quả tăng cường độ sớm mà không gây suy giảm nghiêm trọng cường độ về sau. Để đánh giá khả năng ứng dụng thực tiễn, cần thêm nghiên cứu ở các tuổi dài hơn nhằm làm rõ rủi ro hình thành ettringite muộn và ảnh hưởng đến độ bền lâu dài của vật liệu.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Flatt R. J., Roussel N., Cheeseman C. R. (2012). Concrete: An eco-material that needs to be improved. *Journal of the European Ceramic Society*, Elsevier, 32:2787–1798.
- [2]. Deja J., Uliasz-Bohenczyk A., Mokrzycki E. (2010). CO₂ emissions from the polish cement industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Elsevier, 4:583–588.
- [3]. Bosoaga A., Masek O., Oakey J. E. (2009). CO₂ capture technology for cement technology. *Energy Procedia*, Elsevier, 1:133-140.
- [4]. Lottenbach B., Scrivener K., Hooton R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 41:1244–1256.
- [5]. Scheider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. (2011). Sustainable cement production – present and future. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 41, 642–650.

- [6]. Cho Y. K., Jung S. H., Choi Y.C. (2019). Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 204:255–264.
- [7]. Metha P.K., Monteiro P.J.M. (2006). *Concrete, microstructure, properties and materials*. McGraw-Hill, New York.
- [8]. Liu K., Deng M., Mo L. (2013). Effect of fly ash on resistance to sulfate attack of cement-based materials. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, 539:124-129.
- [9]. Thomas M. (2009). *Optimizing the use of fly ash in concrete*. Portland cement Association.
- [10]. 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.
- [11]. You K.S., Cho J.S., Ahn J.W., Han G.C. (2006). Hydration behavior of blast furnace slag activated by Ca_2SO_4 and fineness of slag. *Resources Processing*, 53:23-28.
- [12]. Joseph S., Snellings R., Cizer O. (2019). Activation of Portland cement blended with high volume of fly ash using Na_2SO_4 . *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 104:103417.
- [13]. Collins F., Sanjayan J.G. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 29:455-458.
- [14]. Shi C., Krivenko P.V., Roy D. (2006). *Alkali-activated cement and concretes*. First Edition, Taylor & Francis, London.
- [15]. Donatello S., Fernandez-Jimenez A., Palomo A. (2013). Very high volume fly ash cements. Early age hydration study using Na_2SO_4 as an activator. *Journal of the American Ceramic Society*. 96(3):900-906.
- [16]. 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.
- [17]. 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.
- [18]. Joseph S., Cizer O. (2020). Hydration of hybrid cements at low temperatures a study on portland cement-blast furnace slag - Na_2SO_4 . *Materials*, 15(5):1914.
- [19]. 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.
- [20]. 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.
- [21]. TCVN 6016:2011. *Xi măng – Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [22]. TCVN TCVN 6260:2020. *Xi măng Pooc lăng hỗn hợp*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [23]. Taylor, H.F.W. (1997). *Cement Chemistry*. Second Edition. Thomas Telford Publishing, London.
- [24]. Mota B., Matschei T., Scrivener K. (2018). Impact of NaOH and Na_2SO_4 on the kinetics and microstructural development of white cement hydration. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 108:172–185.