

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

Nguyễn Dương Định^{1*}, Nguyễn Mạnh Cường¹

¹ Đại học Bách khoa Hà Nội

TỪ KHOÁ

Canxi nitrat
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 canxi nitrat (CN) đến một số tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Hàm lượng CN được khảo sát bao gồm 0%, 0,1%, 0,2%, 0,3% và 0,4%. Các tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp được nghiên cứu bao gồm lượng nước tiêu chuẩn, nhiệt thủy hóa trong 24 giờ đầu, thời gian đông kết, và cường độ nén ở các tuổi 1 và 7 ngày. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc tăng hàm lượng CN từ 0% đến 0,4% không ảnh hưởng đáng kể tới lượng nước tiêu chuẩn. Kết quả nhiệt thủy hóa cho thấy CN thúc đẩy đáng kể quá trình thủy hóa của xi măng ở tuổi sớm, làm tăng nhiệt độ hồ xi măng so với mẫu đối chứng. CN làm giảm đáng kể thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết của xi măng, mẫu sử dụng 0,4% CN có mức giảm tương ứng lần lượt là 25 phút và 35 phút so với mẫu đối chứng. CN làm tăng đáng kể cường độ nén ở 1 ngày và 7 ngày tuổi, với mức tăng lớn nhất ở mẫu sử dụng 0,4% CN đạt khoảng 33% (ở 1 ngày) và 18% (ở 7 ngày) so với mẫu đối chứng. Trong khoảng tỷ lệ CN được nghiên cứu, ảnh hưởng của CN tới nhiệt thủy hóa, thời gian đông kết và cường độ nén trở nên rõ rệt hơn khi tăng hàm lượng CN. Nghiên cứu cho thấy CN có tiềm năng được sử dụng hiệu quả để cải thiện cường độ tuổi sớm của xi măng Poóc lăng hỗn hợp.

KEYWORDS

Calcium nitrate
Blended Portland cement
Compressive strength
Heat of hydration
Properties

ABSTRACT

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

1. Giới thiệu

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

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

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

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

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

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

sản xuất xi măng. Trên thế giới, từ thập niên 1980 canxi nitrat (CN), có công thức hóa học $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, đã được sử dụng thay thế CaCl_2 trong chế tạo bê tông cốt thép do CN giúp thúc đẩy thủy hóa của xi măng mà không gây ăn mòn cốt thép trong bê tông [4].

Có nhiều nghiên cứu tập trung vào ảnh hưởng của CN tới quá trình thủy hóa, các tính chất của xi măng Poóc lăng [3, 5-9]. Kết quả cho thấy khi sử dụng ở hàm lượng thích hợp, CN có thể rút ngắn thời gian đông kết và gia tăng cả cường độ tuổi sớm và muộn của xi măng Poóc lăng [3, 5, 6, 8, 9]. Điều này là do CN có thể thúc đẩy quá trình thủy hóa của các khoáng trong clanhke bao gồm C_3S , C_3A , và có thể cả C_2S [9].

CN làm gia tăng sự hình thành ettringite trong quá trình thủy hóa xi măng Poóc lăng [9]. Các ion NO_3^- sinh ra từ sự hòa tan của CN trong dung dịch lỗ rỗng thay thế ion SO_4^{2-} trong pha AFm tạo ra sản phẩm thủy hóa $\text{NO}_3\text{-AFm}$. Quá trình này làm tăng lượng SO_4^{2-} tự do trong dung dịch lỗ rỗng, từ đó thúc đẩy sự hình thành ettringite nhiều hơn [9, 10].

CN có khả năng rút ngắn giai đoạn cảm ứng và thúc đẩy quá trình thủy hóa các khoáng silicat, đặc biệt là C_3S và có thể cả C_2S [5, 9, 11]. Cơ chế được cho là liên quan đến sự gia tăng nồng độ Ca^{2+} trong dung dịch lỗ rỗng khi CN hòa tan, làm cho dung dịch đạt trạng thái quá bão hòa đối với $\text{Ca}(\text{OH})_2$ trong thời gian ngắn hơn. Kết quả là các tinh thể portlandit (CH) được hình thành sớm, tạo điều kiện cho quá trình thủy hóa C_3S bước vào giai đoạn tăng tốc sớm hơn so với mẫu không sử dụng CN [5, 9].

El-didamony và cộng sự [12] nghiên cứu ảnh hưởng của CN đến quá trình thủy hóa của C_2S và thấy rằng CN tăng tốc độ thủy hóa của khoáng này.

Ở trên thế giới, rất ít nghiên cứu tập trung vào ảnh hưởng của CN tới quá trình thủy hóa và các tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp [13, 14]. Kết quả nghiên cứu của Derakhshani và cộng sự [13] cho thấy việc sử dụng 1 % CN làm tăng cường độ của xi măng Poóc lăng puzolan ở cả tuổi sớm và muộn. Skripkiunas và cộng sự [4] cũng ghi nhận việc sử dụng 0.5 % và 1 % CN làm tăng cường độ của bê tông sử dụng xi măng đá vôi.

Tại Việt Nam, đã có một số nghiên cứu bước đầu đánh giá khả năng sử dụng CN nhằm cải thiện cường độ tuổi sớm của vật liệu gốc xi măng. Chẳng hạn, nghiên cứu của Lưu và cộng sự [15] cho thấy việc sử dụng CN có thể làm tăng cường độ nén tuổi 3 và 7 ngày của bê tông

nhẹ sử dụng hàm lượng lớn xi hạt lò cao nghiền mịn để thay thế xi măng Poóc lăng. Tuy nhiên, các nghiên cứu công bố về ảnh hưởng của CN đối với quá trình thủy hóa và các tính chất của xi măng Poóc lăng hỗn hợp sản xuất trong nước hiện vẫn còn rất hạn chế.

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá khả năng ứng dụng CN làm phụ gia tăng cường độ sớm của xi măng Poóc lăng hỗn hợp của nhà máy xi măng trong nước. Nghiên cứu tập trung khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng CN tới lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết, cường độ nén 1 và 7 ngày, nhiệt độ hồ xi măng trong 24h đầu tiên.

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 PCB40 công nghiệp được sản xuất trong nước. Thành phần 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 CN được sử dụng là sản phẩm công nghiệp có độ tinh khiết 99 %.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Hồ xi măng và vữa xi măng được chuẩn bị theo quy trình sau. CN được cân theo hàm lượng thiết kế và hòa tan trong nước trộn bằng máy khuấy cơ học trong 3 phút để đảm bảo phụ gia phân tán đồng nhất. 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.

Lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của xi măng được xác định theo TCVN 6017:2011 [16]. Cường độ nén của các mẫu vữa xi măng được xác định theo TCVN 6016:2011 [17].

Nhiệt thủy hóa của các mẫu hồ xi măng 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.

Bảng 1. Thành phần của xi măng PCB40.

Thành phần	Clanhke	Thạch cao	Đá vôi	Đá bazan	Tro đáy	Tro bay
Tỷ lệ (%)	74,1	3,4	8,6	3,4	6,8	3,7

Bảng 2. Thành phần hóa của clanhke.

Oxit	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Tỷ lệ (%)	21,43	5,54	3,36	64,56	2,15	0,11	0,63	0,36

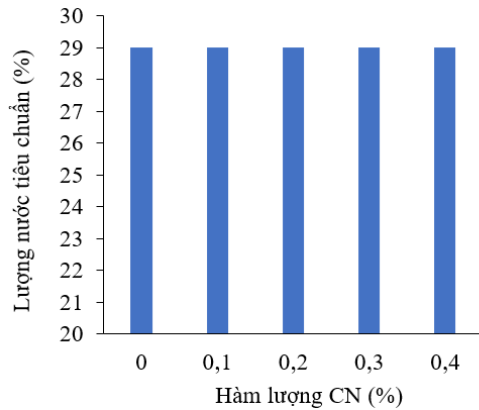
Bảng 3. Thành phần khoáng của clanhke (tính theo công thức Bogue).

Khoáng	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Tỷ lệ (%)	50,6	23,4	9,0	10,2

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Lượng nước tiêu chuẩn

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

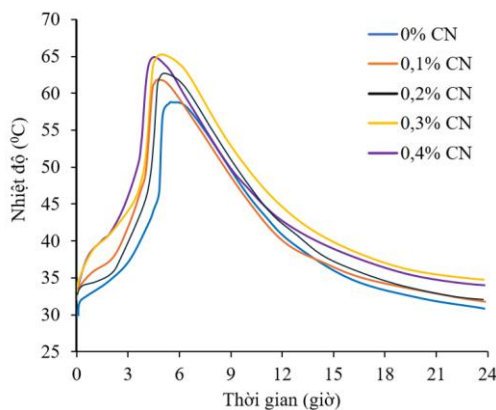


Hình 1. Lượng nước tiêu chuẩn của các mẫu xi măng.

Kết quả trong Hình 1 cho thấy lượng nước tiêu chuẩn của các mẫu có sử dụng CN đều tương tự mẫu đối chứng. Điều này cho thấy phụ gia CN không làm ảnh hưởng đáng kể đến lượng nước tiêu chuẩn của xi măng.

3.2. Nhiệt thủy hóa

Kết quả thí nghiệm xác định nhiệt thủy hóa của các mẫu xi măng sử dụng hàm lượng CN khác nhau được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. Nhiệt thủy hóa của các mẫu xi măng.

Kết quả trong Hình 2 cho thấy CN làm rút ngắn giai đoạn cảm ứng, khiến giai đoạn tăng tốc của quá trình thủy hóa xuất hiện sớm hơn. Vị trí peak nhiệt độ của hồ xi măng cũng dịch chuyển về thời gian ngắn hơn và nhiệt độ đỉnh peak tăng lên. Các hiệu ứng này của CN tăng lên khi tăng hàm lượng CN từ 0 đến 0,4 %. Ở mẫu đối chứng, đỉnh

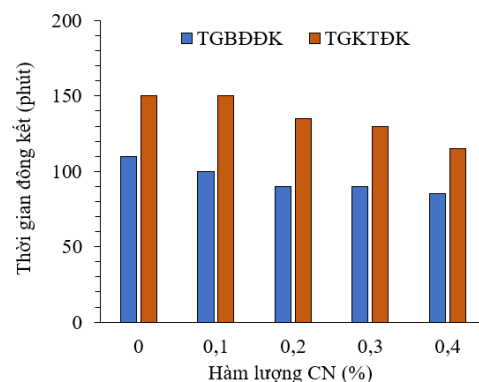
peak xuất hiện lúc 6 giờ và ở nhiệt độ 59 °C. Trong khi đó ở mẫu 0,4 % CN, đỉnh peak xuất hiện lúc 4,5 giờ và ở nhiệt độ 65 °C. Các kết quả này tương đồng với các nghiên cứu trước đây về ảnh hưởng của CN đến quá trình thủy hóa xi măng [7-9].

Sự gia tăng nhiệt độ hồ xi măng khi sử dụng CN có liên quan đến khả năng thúc đẩy thủy hóa của các khoáng silicat và aluminat trong clanhke. Đối với khoáng C_3S , CN làm tăng nồng độ Ca^{2+} trong dung dịch lỏng rỗng, qua đó đẩy nhanh quá trình thủy hóa. Đối với khoáng C_3A , các ion NO_3^- tham gia hình thành NO_3^-AFm , làm tăng lượng SO_4^{2-} tự do trong dung dịch lỏng rỗng và tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành ettringite. Kết quả là các sản phẩm thủy hóa ban đầu như C-S-H, CH và ettringite được tạo thành với tốc độ cao hơn, làm tăng tốc độ tỏa nhiệt trong giai đoạn đầu của quá trình thủy hóa [5, 9].

Ngoài tác động đến các khoáng clanhke, CN cũng có thể thúc đẩy phản ứng của các phụ gia khoáng hoạt tính trong xi măng Poóc lăng hỗn hợp. Hill và cộng sự [18] cho thấy việc bổ sung CN làm tăng mức độ thủy hóa của tro bay loại C và làm tăng nhiệt thủy hóa ở tuổi sớm. Cơ chế được cho là liên quan tới khả năng hoạt hóa của CN, tạo điều kiện thuận lợi cho sự hòa tan và phản ứng của các pha hoạt tính trong tro bay. Do đó, đối với xi măng Poóc lăng hỗn hợp chứa các phụ gia khoáng hoạt tính, sự gia tăng nhiệt độ hồ xi măng quan sát được có thể là kết quả của cả việc thúc đẩy thủy hóa clanhke và tăng cường hoạt hóa các phụ gia khoáng.

3.3. 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 3.



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

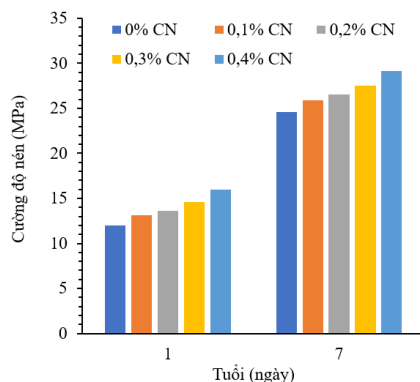
Kết quả trong Hình 3 ta thấy các mẫu xi măng có phụ gia đều có thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết ngắn hơn mẫu đối chứng, chứng tỏ CN có tác dụng làm giảm thời gian đông kết của xi măng. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây [3, 5, 6, 8]. Xu hướng rút ngắn thời gian đông kết của CN cũng phù hợp với kết quả đo nhiệt độ

của hồ xi măng khi CN làm rút ngắn thời gian của giai đoạn cảm ứng và tăng nhiệt độ của hồ xi măng ở các giai đoạn đầu của quá trình thủy hóa. Điều này cho thấy CN đã thúc đẩy các phản ứng thủy hóa xảy ra sớm hơn và với tốc độ cao hơn. Đối với xi măng Poóc lăng hỗn hợp, ngoài việc tăng tốc độ thủy hóa các khoáng clanhke, CN còn có khả năng thúc đẩy sự hoạt hóa của các phụ gia khoáng hoạt tính, làm gia tăng tốc độ hình thành các sản phẩm thủy hóa ban đầu như ettringite, C-S-H và CH [9, 18]. Sự phát triển nhanh hơn của các sản phẩm thủy hóa này làm cho cấu trúc hồ xi măng sớm đạt trạng thái mất tính dẻo, dẫn đến thời gian đông kết ngắn hơn so với mẫu đối chứng.

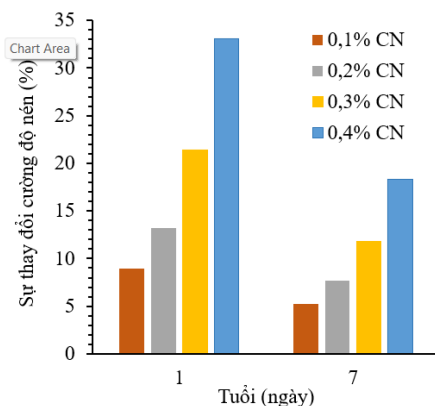
Kết quả cũng cho thấy khi tăng hàm lượng CN từ 0 % đến 0,4 %, thời gian bắt đầu đông kết giảm dần (từ 110 xuống 85 phút), thời gian kết thúc đông kết cũng giảm dần (từ 150 xuống 115 phút), nhưng vẫn đáp ứng yêu cầu trong tiêu chuẩn TCVN 6260:2020 [19]. Xu hướng này cho thấy hiệu quả tăng tốc quá trình thủy hóa xi măng của CN trở nên rõ rệt hơn khi hàm lượng CN tăng, phù hợp với kết quả nhiệt thủy hóa đã trình bày ở trên.

3.4. Cường độ nén

Kết quả xác định cường độ nén của các mẫu thử ở 1 và 7 ngày được biểu diễn trong các Hình 4 và 5.



Hình 4. Cường độ nén của các mẫu thử xi măng.



Hình 5. Sự thay đổi cường độ nén của các mẫu có phụ gia CN so với mẫu đối chứng.

Kết quả trong Hình 4 cho thấy việc bổ sung CN làm tăng cường độ nén của xi măng ở cả tuổi 1 và 7 ngày. Cường độ nén của xi măng tăng dần khi hàm lượng CN tăng từ 0 đến 0,4 %. Mức tăng cường độ lớn nhất đạt khoảng 33 % ở tuổi 1 ngày và 18 % ở tuổi 7 ngày so với mẫu đối chứng, như thể hiện trong Hình 5. Như vậy khả năng tăng cường độ của CN rõ rệt hơn ở tuổi 1 ngày và giảm dần theo thời gian.

Sự gia tăng cường độ nén phù hợp với kết quả nhiệt thủy hóa và thời gian đông kết đã trình bày ở trên. CN thúc đẩy quá trình thủy hóa và sự hình thành các sản phẩm hydrat ở tuổi sớm của các khoáng clanhke, đồng thời có thể hỗ trợ hoạt hóa các phụ gia khoáng hoạt tính trong xi măng Poóc lăng hỗn hợp [9, 18]. Kết quả là cường độ nén của các mẫu có CN cao hơn so với mẫu đối chứng.

Mức tăng cường độ ở tuổi 1 ngày cao hơn đáng kể so với tuổi 7 ngày cho thấy tác dụng chủ yếu của CN là thúc đẩy quá trình thủy hóa ở giai đoạn đầu. Khi tuổi thủy hóa tăng lên, mức độ thủy hóa của các mẫu đối chứng cũng tiếp tục phát triển, làm giảm chênh lệch cường độ giữa các mẫu có và không sử dụng CN.

4. Kết luận

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu đối với các mẫu xi măng Poóc lăng hỗn hợp đối chứng và các mẫu có bổ sung CN ở các mức 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % và 0,4 %, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- CN không ảnh hưởng đáng kể đến lượng nước tiêu chuẩn của xi măng Poóc lăng hỗn hợp nghiên cứu trong phạm vi hàm lượng nghiên cứu.
 - CN làm rút ngắn đáng kể thời gian bắt đầu và thời gian kết thúc đông kết của xi măng Poóc lăng hỗn hợp nghiên cứu. Khi tăng hàm lượng CN từ 0 đến 0,4 %, thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết giảm tương ứng lần lượt là 25 phút và 35 phút so với mẫu đối chứng. Tuy nhiên, các mẫu xi măng vẫn đáp ứng yêu cầu của TCVN 6260:2020.
 - CN thúc đẩy quá trình thủy hóa của xi măng ở tuổi sớm, thể hiện qua sự gia tăng nhiệt độ thủy hóa của hồ xi măng trong 24 giờ đầu so với mẫu đối chứng.
 - CN làm tăng cường độ nén ở cả 1 và 7 ngày tuổi. Khi tăng hàm lượng CN từ 0 đến 0,4 %, cường độ nén tăng lần lượt khoảng 33 % và 18 % so với mẫu đối chứng. Trong phạm vi nghiên cứu, hiệu quả tăng cường độ có xu hướng tăng khi hàm lượng CN tăng.
 - Trong phạm vi hàm lượng khảo sát, mẫu sử dụng 0,4 % CN cho hiệu quả cải thiện thời gian đông kết và cường độ nén tuổi sớm cao nhất.
- Kết quả nghiên cứu cho thấy CN có tiềm năng được sử dụng như một phụ gia tăng tốc hiệu quả nhằm cải thiện quá trình thủy hóa và sự phát triển cường độ tuổi sớm của xi măng Poóc lăng hỗn hợp được khảo sát.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Heikal M. (2004). Effect of calcium formate as an accelerator on the physicochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 34:1051 – 1056.

- [2]. Hemalatha T., Sasmal S. (2017). Early-age strength development in fly ash blended cement composites: investigation through chemical activation. *Magazine of Concrete Research*, DOI: 10.1680/jmacr.17.00336
- [3]. Ramachandran V.S. (1995). Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. Second Edition. *Noyes Publications*, USA.
- [4]. Tokar V. (1981). Additive composition for Portland cement materials. US patent 4,337,094. Euclid Chemical Co.
- [5]. Justnes H., Nygaard E. C. (1996). Technical calcium nitrate as set accelerator for cement pastes at low temperatures. *Advances in Cement Research*, ICE Publishing, 8(31):101-109.
- [6]. Chikh N., Cheikh-Zouaoui M., Aggoun S., Duval R. (2008). Effects of calcium nitrate and triisopropanolamine on the setting and strength evolution of Portland cement pastes. *Materials and Structures*, RILEM, 41:31-36.
- [7]. Bost P., Regnier M., Horgnies M. (2016). Comparison of the accelerating effect of various additions on the early hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 113:290-296.
- [8]. Kicaite A., Skripkiunas G., Pundiene I. (2020). The effect of calcium nitrate on the properties of Portland cement pastes and concrete hardening at low temperatures. *Ceramics-Silikaty*, 64 (3):263-270.
- [9]. Dorn T., Hirsch T., Stephan D. (2023). Working mechanism of calcium nitrate as an accelerator for Portland cement hydration. *Journal of American Ceramic Society*, 106:752-766.
- [10]. Balonis M., Medala M., Glasser F. P. (2011). Influence of calcium nitrate and nitrite on the constitution of AFm and Aft cement hydrates. *Advances in Cement Research*, ICE Publishing, 23(3):129-143.
- [11]. Oey T. và cộng sự (2015). Comparison of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and CaCl_2 admixtures on reaction, setting, and strength evolutions in plain and blended cementing formulations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, 27(10).
- [12]. El-Didamony H., Sharara A. M., Helmy I.M., El-Aleem S. A. (1996). Hydration characteristics of $\beta\text{-C}_2\text{S}$ in the presence of some accelerators. *Cement and Concrete Research*, 26(8):1179-1187.
- [13]. Derakhshani A., Ghadi A., Vahdat A. E. (2023). Study of the effect of calcium nitrate, calcium formate, triethanolamine, and triisopropanolamine on compressive strength of Portland-pozzolana cement. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, 18:e01799.
- [14]. Skripkiunas G., Kicaite A., Justnes H., Pundiene I. (2021). Effect of calcium nitrate on the properties of Portland-limestone cement-based concrete cured at low temperature. *Materials*, 14:1611.
- [15]. Lưu V. N., Nguyễn V. T., Lê T. T., Lê V. H., Nguyễn C. T (2023). Nghiên cứu nâng cao cường độ tuổi sớm của bê tông nhẹ chịu lực sử dụng hàm lượng lớn xi hạt lò cao nghiền mịn. *Tuyển tập Hội nghị khoa học quốc tế Kỷ niệm 60 năm thành lập Viện KHCN Xây dựng*, 333-339.
- [16]. 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.
- [17]. TCVN 6016:2011. Xi măng – Phương pháp thử - Xác định cường độ. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [18]. Hill R., Daugherty K. (1996). The interaction of calcium nitrate and a Class C fly ash during hydration. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 26 (7):1131-1143.
- [19]. TCVN6260:2020. Xi măng Poóc lăng hỗn hợp - Yêu cầu kỹ thuật. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.