



Ảnh hưởng của metakaolin và nano silica đến cường độ nén và vi cấu trúc của vữa xi măng

Effects of metakaolin and nano silica on the compressive strength and microstructure of cement mortar

Vũ Thị Xuân¹, Lê Mạnh Cường^{2*}, Nguyễn Công Thắng², Bùi Thị Thanh Huyền², Nguyễn Việt Hùng²

¹Khoa Khoa học cơ bản, Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 Phố Cầu Giấy, Phường Láng, Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Vật liệu xây dựng, Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Đồng Tâm, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

*Email: cuonglm@huce.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 27/08/2026

Accepted: 29/09/2026

Published: 30/09/2026

Keywords:

Metakaolin; Nano silica;
Microstructure;
Cement mortar

ABSTRACT

This study examines the effects of metakaolin (MK) and nanosilica (nS) on the setting time, compressive strength, and microstructure of cementitious binders and cement mortar. Portland cement PC40 was partially replaced with MK at levels ranging from 5% to 20% by mass of the binder, while nS was added at concentrations of 0.25% to 0.75% in mixtures containing 10% MK. The results revealed that the inclusion of 10% MK boosted the 28-day compressive strength of the hardened binder from 50.98 MPa to 60.35 MPa. For cement mortar, the mixture with 10% MK and 0.25% nS achieved the highest 28-day compressive strength of 69.65 MPa, which is approximately 16.8% higher than the control mixture. Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS) observations indicated a relatively dense microstructure, as well as the presence of silicon (Si) and aluminum (Al)-rich regions in the MK-nS-modified mortar. These findings suggest that an appropriate combination of MK and nS can enhance both the compressive strength and the microstructure of cement mortar.

Giới thiệu chung

Vữa xi măng là một trong những vật liệu nền quan trọng trong xây dựng, được sử dụng rộng rãi trong các lớp xây, trát, sửa chữa, hoàn thiện và nhiều hệ vật liệu xi măng có yêu cầu kỹ thuật khác nhau. Tính chất của vữa xi măng phụ thuộc vào đặc điểm của chất kết dính, tỷ lệ nước/chất kết dính, cốt liệu mịn, phụ gia hóa học và các phụ gia khoáng được sử dụng. Trong bối cảnh ngành xây dựng hướng tới giảm phát thải CO₂ và nâng cao hiệu quả sử dụng clinker, việc nghiên cứu các phụ gia khoáng hoạt tính thay thế một phần xi măng Portland là hướng tiếp cận có ý nghĩa khoa học và thực tiễn [1-3].

Các phụ gia khoáng hoạt tính, hay vật liệu kết dính bổ sung, có thể tham gia vào hệ xi măng thông qua hiệu ứng vật lý và hóa học. Về mặt vật lý, các hạt mịn có thể lấp đầy một phần lỗ rỗng giữa các hạt xi măng và làm thay đổi cấu trúc lỗ rỗng của đá xi măng. Về mặt hóa học, các pha giàu SiO₂ và Al₂O₃ hoạt tính có thể phản ứng với Ca (OH)₂ sinh ra trong quá trình thủy hóa để tạo thêm các sản phẩm hydrat như C-S-H, C-A-H hoặc C-A-S-H, qua đó góp phần cải thiện cấu trúc và tính chất cơ học của vật liệu [2,4-7].

Metakaolin (MK) là sản phẩm nung hoạt hóa của cao lanh, có thành phần chủ yếu gồm SiO₂ và Al₂O₃ ở trạng thái hoạt tính. So với một số phụ gia khoáng thông dụng, MK thường được xem là phụ gia pozzolan có

hoạt tính cao do cấu trúc aluminosilicate bị mất trật tự sau quá trình nung hoạt hóa. Khi được sử dụng thay thế một phần xi măng, MK có thể tiêu thụ $\text{Ca}(\text{OH})_2$, thúc đẩy hình thành thêm các sản phẩm hydrat và làm đặc chắc cấu trúc đá xi măng. Nhiều nghiên cứu đã cho thấy hiệu quả của MK phụ thuộc đáng kể vào độ hoạt tính, độ mịn, diện tích bề mặt riêng, hàm lượng thay thế, tỷ lệ nước/chất kết dính và đặc điểm xi măng nền [4-10]. Bên cạnh MK, nano silica (nS) là vật liệu được quan tâm trong các hệ xi măng nhờ kích thước hạt rất nhỏ, diện tích bề mặt riêng lớn và hoạt tính bề mặt cao. nS có thể đóng vai trò như tâm mầm cho quá trình tạo sản phẩm thủy hóa, đồng thời phản ứng với $\text{Ca}(\text{OH})_2$ để tạo thêm gel C-S-H. Nhờ đó, nS có thể góp phần cải thiện sự phát triển cường độ và cấu trúc vi mô của vật liệu xi măng [11,12,15,16]. Tuy nhiên, do diện tích bề mặt lớn và xu hướng kết tụ, nS cũng có thể làm tăng nhu cầu nước và ảnh hưởng đến tính công tác của hồ/vữa xi măng nếu không được phân tán phù hợp [13,17].

Việc kết hợp MK và nS trong cùng một hệ chất kết dính có thể tạo ra tác động bổ trợ giữa phụ gia khoáng hoạt tính kích thước micro và phụ gia nano. MK cung cấp nguồn Si và Al hoạt tính, tham gia phản ứng pozzolan và góp phần hình thành các pha hydrat chứa aluminosilicate; trong khi đó, nS có thể thúc đẩy quá trình thủy hóa sớm, tạo thêm gel C-S-H và hỗ trợ cải thiện cấu trúc ở cấp độ nhỏ hơn. Những cơ chế này phù hợp với định hướng ứng dụng công nghệ nano trong vật liệu xi măng và bê tông [14-17].

Từ các phân tích trên, nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của MK và nS đến một số tính chất của hệ chất kết dính và vữa xi măng. Các chỉ tiêu khảo sát gồm thời gian đông kết, cường độ nén của đá chất kết dính, cường độ nén của vữa và đặc trưng vi cấu trúc thông qua SEM/EDS. Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, nghiên cứu nhằm xác định hàm lượng MK và nS phù hợp để cải thiện cường độ nén và làm rõ thêm vai trò của các phụ gia này đối với vi cấu trúc của vữa xi măng.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Thực nghiệm

Nguyên vật liệu sử dụng

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng Portland Bút Sơn PC40. Một số tính chất cơ lý chính của xi măng gồm: lượng sót sàng 0,09 mm là 0,8%; độ mịn Blaine đạt $3660 \text{ cm}^2/\text{g}$; độ dẻo tiêu chuẩn 30,0%; độ ổn định thể tích 0,15 mm; khối lượng riêng $3,10 \text{ g/cm}^3$. Thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết của xi măng lần lượt là 135 phút và 190 phút. Cường độ nén của xi măng ở 3 ngày và 28 ngày lần lượt đạt 26,7 MPa và 48,5 MPa. Các phép

thử liên quan đến độ bền nén và thời gian đông kết được thực hiện theo hệ tiêu chuẩn TCVN tương ứng [18,19].

Metakaolin được sử dụng làm phụ gia khoáng hoạt tính thay thế một phần xi măng theo khối lượng chất kết dính. MK được chế tạo từ cao lanh nung ở nhiệt độ cao, sau đó được nghiền mịn đến kích thước nhỏ hơn $75 \mu\text{m}$. Hình thái hạt MK được khảo sát bằng SEM. Nano silica sử dụng trong nghiên cứu là SiO_2 kích thước nano, được bổ sung với hàm lượng nhỏ trong hệ chất kết dính nhằm khảo sát ảnh hưởng đến thời gian đông kết, cường độ nén và vi cấu trúc của mẫu vữa.

Cát vàng tự nhiên tiêu chuẩn được sử dụng làm cốt liệu mịn trong chế tạo mẫu vữa xi măng. Cát được lựa chọn để bảo đảm thành phần hạt phù hợp, sạch, không lẫn tạp chất hữu cơ, bùn sét hoặc các thành phần có thể ảnh hưởng bất lợi đến quá trình thủy hóa và phát triển cường độ của vữa. Các chỉ tiêu của cốt liệu mịn được xác định theo nhóm phương pháp thử TCVN 7572:2006 [20]. Nước trộn là nước sạch. Phụ gia siêu dẻo thương mại ROADCON-SR 5000F được sử dụng nhằm hỗ trợ phân tán hệ hạt mịn và điều chỉnh tính công tác của hỗn hợp vữa khi có mặt MK và nS.

Cấp phối thí nghiệm

Để đánh giá ảnh hưởng của MK và ảnh hưởng phối hợp của MK với nS đến tính chất của hệ chất kết dính và vữa xi măng.

Bảng 1: Cấp phối mẫu đá chất kết dính

Cấp phối	Xi măng/CKD (%)	MK/CKD (%)	nS/CKD (%)	N/CKD
CP1	100	0	0	0,40
CP2	95	5	0	0,40
CP3	90	10	0	0,40
CP4	85	15	0	0,40
CP5	80	20	0	0,40
CP6	90	10	0,25	0,40
CP7	90	10	0,50	0,40
CP8	90	10	0,75	0,40

Ghi chú: CKD = xi măng + MK; nS được bổ sung thêm ngoài CKD theo % khối lượng CKD.

Hai nhóm mẫu được chế tạo gồm nhóm mẫu đá chất kết dính và nhóm mẫu vữa xi măng. Đối với nhóm đá chất kết dính, tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) được giữ bằng 0,40. Lượng nước được cố định theo tỷ lệ N/CKD = 0,40 nhằm kiểm soát biến số và đảm bảo tính so sánh giữa các cấp phối. Tuy nhiên, do MK và nS có diện tích bề mặt riêng lớn, việc giữ nguyên lượng nước có thể

làm giảm độ lưu động của hỗn hợp; do đó, phụ gia siêu dẻo được sử dụng để điều chỉnh tính công tác về khoảng mong muốn. Trên thực tế, người ta thường chọn lượng nước theo yêu cầu độ sụt hoặc độ chảy, sau đó điều chỉnh chất kết dính để đạt N/X mong muốn. Giữ lượng nước cố định giúp đánh giá ảnh hưởng của cốt liệu, phụ gia đến độ lưu động và độ đặc chắc. Đối với nhóm vữa xi măng, tỷ lệ cát/chất kết dính (C/CKD) được giữ bằng 1,50 và N/CKD bằng 0,35.

Bảng 2: Cấp phối vữa xi măng

Cấp phối	Xi măng/CKD (%)	C/CKD	MK/CKD (%)	nS/CKD (%)	SD/CKD (%)	N/CKD
V1	100	1,50	0	0,00	0,30	0,35
V2	95	1,50	5	0,00	0,25	0,35
V3	90	1,50	10	0,00	0,28	0,35
V4	85	1,50	15	0,00	0,30	0,35
V5	80	1,50	20	0,00	0,35	0,35
V6	90	1,50	10	0,25	0,28	0,35
V7	90	1,50	10	0,50	0,25	0,35
V8	90	1,50	10	0,75	0,22	0,35

Ghi chú: CKD = xi măng + MK. nS được bổ sung thêm ngoài CKD. SD = phụ gia siêu dẻo, tính theo % khối lượng CKD.

Các thành phần bột gồm xi măng, MK và nS được cân theo tỷ lệ thiết kế và trộn khô trước khi bổ sung nước và phụ gia siêu dẻo. Đối với mẫu vữa, cát vàng tiêu chuẩn được bổ sung sau giai đoạn trộn sơ bộ chất kết dính. Hỗn hợp sau khi trộn được đúc vào khuôn, đầm chặt và bảo dưỡng đến tuổi thí nghiệm.

Phương pháp thí nghiệm

Thời gian đông kết của hệ chất kết dính được xác định bằng thiết bị Vicat theo TCVN 6017:2015 [19]. Các mẫu hồ chất kết dính được chuẩn bị từ xi măng, MK, nS và nước theo cấp phối thiết kế. Sau khi trộn đều, hồ chất kết dính được cho vào khuôn Vicat và tiến hành thí nghiệm để xác định thời gian bắt đầu đông kết (Tbd) và thời gian kết thúc đông kết (Tkt).

Cường độ nén của đá chất kết dính được xác định ở tuổi 7 ngày và 28 ngày. Mẫu vữa xi măng được chế tạo theo các cấp phối V1-V8 với kích thước 40 × 40 × 160 mm. Sau khi bảo dưỡng đến tuổi thí nghiệm, mẫu vữa được sử dụng để xác định cường độ nén ở 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày theo nguyên tắc thử cường độ vữa xi măng trong TCVN 6016:2011 [18].

Phương pháp SEM-EDS được sử dụng nhằm khảo sát đồng thời hình thái và thành phần hóa học vi mô của chất kết dính và vữa xi măng. SEM cung cấp ảnh vi cấu trúc bề mặt, sự phát triển của sản phẩm hydrat hóa, hệ

lỗ rỗng và mức độ đặc chắc.[21] EDS xác định thành phần nguyên tố và sự phân bố của chúng, hỗ trợ nhận diện các pha như C-S-H, portlandite, ettringite và vùng chuyển tiếp. Việc kết hợp hai phương pháp này là cần thiết vì vật liệu xi măng có cấu trúc không đồng nhất, kích thước pha nhỏ và phân bố không đều. [21] Các phương pháp phân tích khối chỉ cho thông tin trung bình, trong khi SEM-EDS cho phép phân tích cục bộ cả hình thái lẫn thành phần. Do đó, SEM-EDS phù hợp để làm rõ cơ chế hình thành vi cấu trúc và mối liên hệ giữa vi cấu trúc với tính chất của vữa xi măng. [21]

Kết quả và thảo luận

Ảnh hưởng của metakaolin và nano silica đến thời gian đông kết

Thời gian đông kết là chỉ tiêu phản ánh quá trình hình thành cấu trúc ban đầu của hồ chất kết dính. Kết quả cho thấy việc thay thế một phần xi măng bằng MK làm thay đổi thời gian đông kết của hệ chất kết dính. So với mẫu đối chứng CP1 có Tbd là 123 phút và Tkt là 315 phút, mẫu CP2 sử dụng 5% MK có Tbd giảm xuống 111 phút. Khi hàm lượng MK tăng lên 10%, mẫu CP3 đạt Tbd thấp nhất là 103 phút, giảm khoảng 16,3% so với mẫu đối chứng.

Sự rút ngắn thời gian bắt đầu đông kết ở các hàm lượng MK thấp có thể liên quan đến hiệu ứng hạt mịn và vai trò tạo mầm cho sự hình thành sản phẩm thủy hóa ban đầu. Tuy nhiên, khi hàm lượng MK tăng lên 15% và 20%, Tbd có xu hướng kéo dài, lần lượt đạt 135 phút và 168 phút. Xu hướng này cho thấy hiệu ứng pha loãng clinker và khả năng hấp phụ nước của phụ gia khoáng có thể làm chậm quá trình đạt đến trạng thái bão hòa ion cần thiết cho sự hình thành các sản phẩm thủy hóa sớm [9,10].

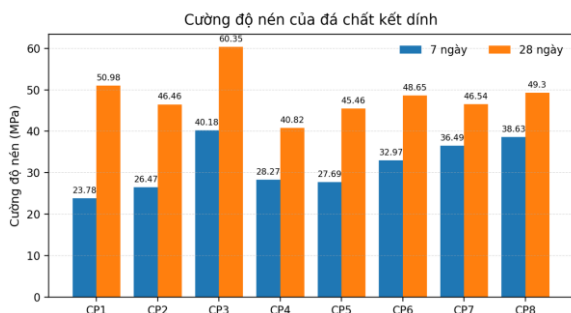
Khi bổ sung nS vào hệ có 10% MK, thời gian đông kết thay đổi mạnh so với mẫu CP3. Các mẫu CP6, CP7 và CP8 có Tbd lần lượt là 304, 326 và 300 phút, cao hơn nhiều so với mẫu CP3. Thời gian kết thúc đông kết của CP6, CP7 và CP8 cũng tăng so với mẫu đối chứng, lần lượt đạt 364, 373 và 350 phút. Sự kéo dài thời gian đông kết khi bổ sung nS trong điều kiện thí nghiệm này có thể liên quan đến diện tích bề mặt riêng lớn, khả năng hấp phụ nước và ảnh hưởng của nS đến sự phân tán hạt trong hồ chất kết dính [12,13,17].

Nhìn chung, 10% MK có xu hướng rút ngắn thời gian bắt đầu đông kết của hệ chất kết dính, trong khi việc bổ sung nS vào hệ chứa 10% MK làm kéo dài đáng kể cả thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết. Kết quả này cho thấy cần kiểm soát hàm lượng nS và điều kiện phân tán khi sử dụng đồng thời MK và nS trong hệ chất kết dính xi măng. Trong điều kiện thí nghiệm này, bổ sung nS làm kéo dài thời gian đông kết. Hiện tượng có thể

liên quan đến đặc tính của nS, trạng thái phân tán và điều kiện nước trộn, tuy nhiên cần thêm bằng chứng để xác định cơ chế chi phối.

Cường độ nén của đá chất kết dính

Cường độ nén của đá chất kết dính phản ánh khả năng chịu tải trọng ép trực tiếp của vật liệu mà không bị nứt vỡ hay phá hủy.



Hình 1: Cường độ nén của đá chất kết dính ở tuổi 7 và 28 ngày

Kết quả cho thấy việc sử dụng MK ảnh hưởng rõ rệt đến cường độ nén của đá chất kết dính. Ở tuổi 7 ngày, mẫu đối chứng CP1 đạt 23,78 MPa. Khi thay thế 5% xi măng bằng MK, cường độ nén của CP2 tăng lên 26,47 MPa. Đặc biệt, mẫu CP3 sử dụng 10% MK đạt 40,18 MPa ở 7 ngày, tăng khoảng 69,0% so với CP1. Điều này cho thấy ở hàm lượng 10%, MK có tác động tích cực đến sự phát triển cường độ sớm của hệ chất kết dính.

Ở tuổi 28 ngày, mẫu CP3 tiếp tục đạt giá trị cường độ nén cao nhất, đạt 60,35 MPa, cao hơn khoảng 18,4% so với mẫu đối chứng CP1 là 50,98 MPa. Sự gia tăng này có thể liên quan đến phản ứng pozzolan của MK với Ca(OH)_2 sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng, tạo thêm các sản phẩm hydrat như C-S-H và C-A-H, góp phần cải thiện cấu trúc của đá chất kết dính. Ngoài ra, kích thước hạt mịn và diện tích bề mặt của MK cũng có thể tạo hiệu ứng lấp đầy, làm tăng mức độ đặc chắc của nền chất kết dính [4-10].

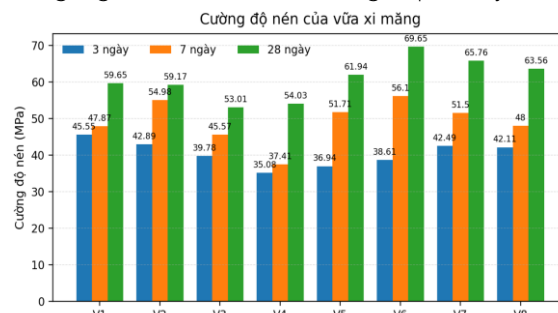
Tuy nhiên, khi hàm lượng MK tăng lên 15% và 20%, cường độ nén có xu hướng giảm. Ở tuổi 28 ngày, mẫu CP4 và CP5 đạt lần lượt 40,82 MPa và 45,46 MPa, thấp hơn mẫu đối chứng tương ứng khoảng 19,9% và 10,8%. Xu hướng này cho thấy việc thay thế xi măng bằng MK vượt quá hàm lượng phù hợp có thể làm giảm hiệu quả phát triển cường độ, có thể do hiệu ứng pha loãng clinker và phản ứng pozzolan chưa đủ bù lại sự suy giảm hàm lượng xi măng trong hệ ở tuổi thí nghiệm.

Đối với các mẫu sử dụng đồng thời 10% MK và nS, cường độ nén ở tuổi 7 ngày của CP6, CP7 và CP8 lần lượt đạt 32,97 MPa, 36,49 MPa và 38,63 MPa, đều cao hơn mẫu đối chứng CP1. Tuy nhiên, so với mẫu CP3 chỉ sử dụng 10% MK, cường độ 7 ngày của các mẫu có nS

lại thấp hơn. Ở tuổi 28 ngày, CP6, CP7 và CP8 đạt lần lượt 48,65 MPa, 46,54 MPa và 49,30 MPa, thấp hơn CP3 và xấp xỉ hoặc thấp hơn CP1. Điều này cho thấy trong nhóm mẫu đá chất kết dính, việc bổ sung nS với hàm lượng 0,25-0,75% trên nền 10% MK chưa làm tăng cường độ nén 28 ngày trong điều kiện thí nghiệm này.

Cường độ nén của vữa xi măng

Cường độ nén của vữa xi măng là chỉ tiêu đánh giá khả năng chịu lực ép tối đa trên một đơn vị diện tích mặt cắt ngang của mẫu vữa mà không bị phá hủy.



Hình 2: Cường độ nén của vữa xi măng ở tuổi 3, 7 và 28 ngày.

Kết quả cho thấy cường độ nén của vữa xi măng thay đổi rõ rệt theo hàm lượng MK và nS. Mẫu đối chứng V1 đạt cường độ nén 45,55 MPa ở 3 ngày, 47,87 MPa ở 7 ngày và 59,65 MPa ở 28 ngày. Đây là cơ sở để đánh giá hiệu quả của các cấp phối có sử dụng phụ gia khoáng. Đối với các mẫu chỉ sử dụng MK, cường độ nén ở tuổi 3 ngày có xu hướng giảm so với mẫu đối chứng. Các mẫu V2, V3, V4 và V5 đạt cường độ 3 ngày lần lượt là 42,89 MPa, 39,78 MPa, 35,08 MPa và 36,94 MPa, thấp hơn V1 từ khoảng 5,8% đến 23,0%. Điều này cho thấy việc thay thế một phần xi măng bằng MK có thể làm giảm cường độ sớm của vữa trong điều kiện thí nghiệm này do hàm lượng clinker tham gia thủy hóa ban đầu giảm.

Ở tuổi 28 ngày, các mẫu chỉ sử dụng MK có cường độ nén dao động từ 53,01 MPa đến 61,94 MPa. Mẫu V2 sử dụng 5% MK đạt 59,17 MPa, gần tương đương mẫu đối chứng. Mẫu V3 và V4 đạt lần lượt 53,01 MPa và 54,03 MPa, thấp hơn V1. Trong khi đó, mẫu V5 sử dụng 20% MK đạt 61,94 MPa, cao hơn mẫu đối chứng khoảng 3,8%, tuy nhiên chênh lệch này cần kiểm chứng thống kê khi có dữ liệu lặp. Kết quả này cho thấy MK riêng rẽ chưa tạo ra xu hướng tăng cường độ rõ ràng trong toàn bộ dải hàm lượng khảo sát.

Đối với các mẫu phối hợp 10% MK với nS, cường độ nén 28 ngày tăng rõ rệt so với mẫu đối chứng và so với mẫu V3 chỉ sử dụng 10% MK. Mẫu V6 sử dụng 10% MK và 0,25% nS đạt cường độ nén 69,65 MPa ở tuổi 28 ngày, cao hơn V1 khoảng 16,8% và cao hơn V3 khoảng 31,4%.

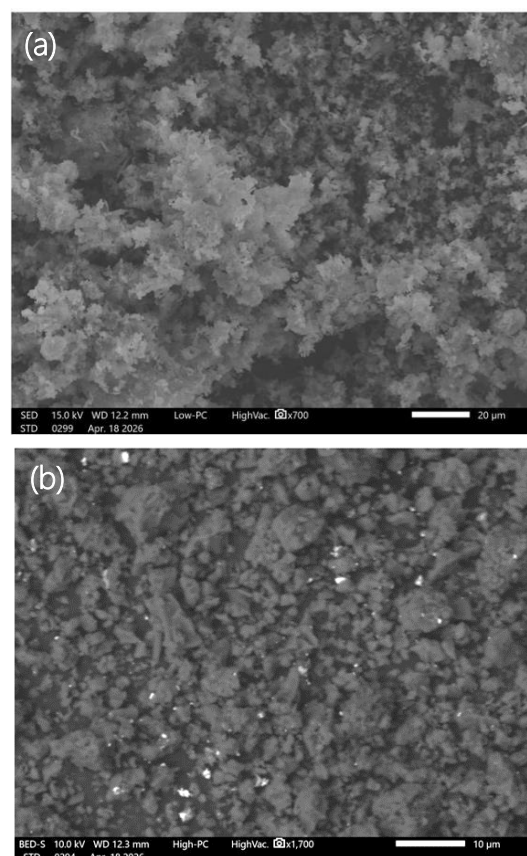
Mẫu V7 sử dụng 0,50% nS đạt 65,76 MPa, cao hơn V1 khoảng 10,2%, trong khi V8 sử dụng 0,75% nS đạt 63,56 MPa, cao hơn V1 khoảng 6,6%. Như vậy, trong phạm vi nghiên cứu này, cấp phối V6 cho cường độ nén 28 ngày cao nhất trong phạm vi khảo sát.

Sự khác biệt về xu hướng phát triển cường độ giữa hồ và vữa chủ yếu bắt nguồn từ vai trò của vùng chuyển tiếp và sự tương tác giữa các thành phần. Trong khi hồ xi măng chỉ chịu ảnh hưởng bởi vi cấu trúc của bản thân chất kết dính, vữa còn phụ thuộc vào liên kết giữa hồ và cốt liệu tại vùng chuyển tiếp. Phụ gia siêu dẻo đóng vai trò quyết định trong việc tạo ra sự khác biệt này: trong hồ, phụ gia siêu dẻo phân tán hạt xi măng nhưng có thể không cải thiện cường độ; ngược lại, trong vữa, phụ gia siêu dẻo giúp phân tán hiệu quả các hạt mịn (MK, nS) và cải thiện đáng kể cấu trúc vùng chuyển tiếp, dẫn đến cường độ vữa cao hơn. Nano silica (nS) và metakaolin (MK) đóng góp vào cường độ thông qua phản ứng pozzolanic và hiệu ứng filler, nhưng lợi ích của chúng trong vữa được khuếch đại nhờ sự phân tán tốt hơn nhờ phụ gia siêu dẻo, đặc biệt là khả năng làm đặc chắc vùng chuyển tiếp. Do đó, sự khác biệt về xu hướng cường độ là kết quả của sự tương tác cộng hưởng giữa phụ gia siêu dẻo, nS và MK, trong đó phụ gia siêu dẻo là yếu tố kích hoạt chính, còn nS và MK là những chất cải thiện vi cấu trúc, với hiệu quả phụ thuộc vào mức độ phân tán.

Đặc trưng vi cấu trúc SEM/EDS

Ảnh SEM 3(a) của MK cho thấy vật liệu có hình thái hạt không đều, gồm các mảnh dạng phiến, khối vụn và các cụm hạt kết tụ. Bề mặt hạt tương đối gồ ghề, xấp và có sự phân bố kích thước không đồng nhất. Đặc điểm hình thái này phù hợp với bản chất của MK là sản phẩm nung hoạt hóa từ cao lanh, trong đó cấu trúc lớp ban đầu bị phá vỡ một phần trong quá trình nung. Hình thái hạt mịn, gồ ghề và xấp có thể hỗ trợ hiệu ứng lấp đầy trong hệ chất kết dính xi măng, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho phản ứng pozzolan giữa pha aluminosilicate hoạt tính và $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [4,6,9].

Đối với mẫu vữa chứa MK và nS, ảnh SEM ở hình 3(b) ở tuổi 28 ngày cho thấy nền vi cấu trúc tương đối đặc chắc. Có thể quan sát thấy pha nền liên tục cùng với nhiều hạt mịn và cụm hạt nhỏ phân bố trên bề mặt. Ở độ phóng đại cao, bề mặt mẫu vữa xuất hiện nhiều hạt mịn kích thước dưới micromet, phân bố thành các cụm nhỏ trên nền pha liên tục. Hình thái này gợi ý sự hình thành và phân bố của các sản phẩm hydrat dạng gel trong hệ xi măng có sử dụng MK và nS, phù hợp với vai trò cải thiện vi cấu trúc được ghi nhận trong các nghiên cứu trước [8,12,15,17].



Hình 3: Ảnh SEM cấu trúc mẫu MK detector SE, x700 (a) và mẫu MK 10% + 0,25% nS (V6) (28 ngày), detector BSE, x1700 (b)

Phân tích EDS được thực hiện ở chế độ điểm tại bốn vị trí đại diện trên bề mặt mẫu vữa chứa 10% MK và 0,25% nS ở tuổi 28 ngày. Kết quả được chuẩn hóa về 100% khối lượng cho các nguyên tố Ca, Si, Al, O. Các nguyên tố vi lượng khác (Mg, S, C, Fe, Na, K) có hàm lượng thấp (< 2%) và không được trình bày nhằm tập trung vào các nguyên tố đặc trưng cho sản phẩm phản ứng pozzolanic. Được thể hiện qua bảng dưới đây.

Bảng 3: Thành phần nguyên tố (EDS)

Mẫu	Ca(%)	Si(%)	Al(%)	O(%)
Spc_001	28,52	11,46	4,52	55,5
Spc_002	22,71	13,25	6,84	57,2
Spc_003	52,5	0,8	0,5	46,2
Spc_004	26,39	10,3	5,31	58,0

Kết quả EDS cho thấy vi cấu trúc của mẫu vữa chứa 10% MK và 0,25% nS ở tuổi 28 ngày không đồng nhất rõ rệt, với hàm lượng Ca dao động từ 22,71% đến 52,5% khối lượng.

Từ số liệu Bảng 3, các tỷ lệ nguyên tử Ca/Si và Al/(Si+Al) được tính toán: Spc_001, Spc_002 và Spc_004 có Ca/Si (ngt) lần lượt là 1,74; 1,20 và 1,80, và Al/(Si+Al) (ngt) lần lượt là 0,29; 0,35 và 0,35. Các giá trị

này nằm trong dải đặc trưng của C-A-S-H ($\text{Ca/Si} = 1,2\text{--}1,8$; $\text{Al}/(\text{Si}+\text{Al}) = 0,20\text{--}0,35$), sản phẩm chính của phản ứng pozzolanic giữa MK, nS và $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Sự khác biệt về thành phần giữa ba vùng này phản ánh khoảng cách đến hạt MK: Spc_002 ($\text{Ca/Si} = 1,20$; $\text{Al} = 6,84\%$) gần hạt MK nhất, giàu Al và Si; Spc_001 ($\text{Ca/Si} = 1,74$; $\text{Al} = 4,52\%$) xa hạt MK hơn, ít Al hơn; Spc_004 ($\text{Ca/Si} = 1,80$; $\text{Al} = 5,31\%$) ở vị trí trung gian.

Spc_003 có $\text{Ca} = 52,5\%$ khối lượng và Ca/Si (ngt) $\approx 46,0$, cao hơn nhiều so với C-A-S-H và gần với giá trị lý thuyết của portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ tinh khiết có $\text{Ca} = 54,1\%$ khối lượng). Đây là vùng giàu portlandite còn dư sau 28 ngày hydrat hóa.

Sự đồng thời tồn tại của C-A-S-H và portlandite phản ánh trạng thái hydrat hóa chưa hoàn toàn ở tuổi 28 ngày, đồng thời cho thấy MK và nS đã tham gia vào phản ứng pozzolanic để tạo C-A-S-H.

Kết luận

- Việc sử dụng metakaolin (MK) và nano silica (nS) có ảnh hưởng rõ rệt đến thời gian đông kết và cường độ của hệ chất kết dính xi măng. Trong nhóm đá chất kết dính, mẫu chứa 10% MK đạt cường độ nén 28 ngày cao nhất trong các cấp phối khảo sát.

- Kết quả SEM cho thấy mẫu vữa chứa MK và nS có vi cấu trúc tương đối đặc chắc. Phân tích EDS ghi nhận sự phân bố không đồng nhất của Ca, Si và Al, với các vùng giàu Si và Al có thể liên quan đến sản phẩm phản ứng pozzolanic của MK và nS. Tuy nhiên, do EDS không xác định trực tiếp pha khoáng, cần thêm XRD, FTIR hoặc TGA để khẳng định sự hình thành C-A-S-H.

- Trong các cấp phối vữa khảo sát, mẫu chứa 10% MK và 0,25% nS (V6) đạt cường độ nén 28 ngày cao nhất (69,65 MPa), tăng khoảng 16,8% so với mẫu đối chứng. Các nghiên cứu tiếp theo cần đánh giá thêm cơ chế phản ứng và độ bền lâu thông qua XRD, FTIR, TGA và các chỉ tiêu về độ hút nước, thấm ion và khả năng chống xâm thực.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2025-CB-016-TĐ.

Tài liệu tham khảo

1. K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, *Cem. Concr. Res.*, 114 (2018) 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

2. R. Snellings, G. Mertens, J. Elsen, *Rev. Mineral. Geochem.*, 74(1) (2012) 211–278. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>
3. D. da S. Andrade, J.H. da S. Rêgo, P.C. Morais, M. Frías Rojas, *Constr. Build. Mater.*, 159 (2018) 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.123>
4. N. Shafiq, R. Kumar, M. Zahid, R.F. Tufail, *Materials*, 12(14) (2019) 2291. <https://doi.org/10.3390/ma12142291>
5. D.G.L. Pinheiro, M.I.C. Sousa, F. Pelisser, *Materials*, 16(5) (2023) 1837. <https://doi.org/10.3390/ma16051837>
6. M. Sharma, S. Bishnoi, F. Martirena, K. Scrivener, *Cem. Concr. Res.*, 149 (2021) 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
7. K. Khan, M.A.M. Johari, M.N. Amin, M. Iqbal, *Case Stud. Constr. Mater.*, 20 (2024) e02699. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02699>
8. N. Raveendran, V. Krishnan, *Case Stud. Constr. Mater.*, 20 (2024) e03196. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03196>
9. N. Raveendran, V. Krishnan, *Sci. Rep.*, 15 (2025) 1482. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85358-8>
10. S. Cheng, Z. Shui, Q. Li, T. Sun, R. Yang, *Constr. Build. Mater.*, 127 (2016) 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.117>
11. R. García, E. Reyes, P. Villanueva, M.Á. de la Rubia, J. Fernández, A. Moragues, *Materials*, 13(5) (2020) 1169. <https://doi.org/10.3390/ma13051169>
12. G. Land, D. Stephan, *J. Mater. Sci.*, 47(2) (2012) 1011–1017. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5881-1>
13. H. Yang, M. Monasterio, D. Zheng, H. Cui, W. Tang, X. Bao, X. Chen, *Constr. Build. Mater.*, 282 (2021) 122715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122715>
14. F. Sanchez, K. Sobolev, *Constr. Build. Mater.*, 24(11) (2010) 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
15. L. Wang, D. Zheng, S. Zhang, H. Cui, D. Li, *Nanomaterials*, 6(12) (2016) 241. <https://doi.org/10.3390/nano6120241>
16. S. Bai, X. Guan, H. Li, J. Ou, *Powder Technol.*, 392 (2021) 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.045>
17. P. Hou, S. Kawashima, D. Kong, D.J. Corr, J. Qian, S.P. Shah, *Compos. Part B Eng.*, 45(1) (2013) 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.056>
18. TCVN 6016:2011, Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ, Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam (2011).
19. TCVN 6017:2015, Xi măng - Phương pháp thử - Xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích, Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam (2015).
20. TCVN 7572:2006, Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử, Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam (2006).
21. L. Li, L. Mao, J. Yang, *Adv. Mater. Technol.*, (2024) 2401175. <https://doi.org/10.1002/admt.202401175>