



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.3.72-82>

***Corresponding author:**

Email address:

minhnhv@utt.edu.vn

Received: 23/03/2025

Received in Revised Form:
17/09/2025

Accepted: 21/09/2025

Effects of mineral additives on the mechanical behavior of marine sand quartz mortar

Van Minh Nguyen^{1*}, Ha Thanh Tran¹, Hai Minh Le¹, Van Trong Nguyen²

¹Faculty of Civil Engineering, University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

²Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

Abstract: This study explores the potential of desalinated marine sand quartz combined with mineral admixtures (fly ash, ground granulated blast slag, and silica fume) to enhance the strength of marine sand quartz mortar (MSQM) for sustainable construction. Experimental results demonstrate that silica fume, with its ultra-fine particle size and high pozzolanic activity, significantly improves compressive and flexural strength, particularly at early stages. Ground granulated blast slag confirms substantial strength enhancement, while fly ash contributes to long-term strength development. A low water-to-cement ratio (W/C) increases strength but reduces workability, necessitating careful mix design considerations. Multiple linear regression analysis was employed to develop highly accurate predictive models for strength, confirming the synergistic effects of mineral admixtures and W/C ratio. This research introduces a novel approach to utilizing marine sand and contributes to minimizing environmental impact and promoting sustainable construction, particularly in coastal regions.

Keywords: Marine sand quartz, fly ash, silica fume, ground granulated blast slag, marine sand quartz mortar, mechanical properties.



Nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia khoáng đến đặc tính cơ học của vữa cát thạch anh biển

Thông tin bài viết

Dạng bài viết:

Bài báo nghiên cứu

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.3.72-82>

*Tác giả liên hệ:

Địa chỉ Email:

minhnhv@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 23/03/2025

Ngày nộp bài sửa: 17/09/2025

Ngày chấp nhận: 21/09/2025

Nguyễn Văn Minh^{1*}, Trần Thanh Hà¹, Lê Minh Hải¹, Nguyễn Văn Trọng²

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Nghiên cứu này xem xét khả năng ứng dụng cát thạch anh biển đã qua xử lý khử mặn trong chế tạo vữa khi kết hợp với các phụ gia khoáng thông dụng như tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn và muối silic, nhằm hướng đến giải pháp vật liệu bền vững. Kết quả thí nghiệm cho thấy muối silic, nhờ kích thước hạt cực nhỏ và hoạt tính pozzolanic mạnh, tạo ra sự gia tăng đáng kể về cường độ nén và uốn, đặc biệt trong giai đoạn sớm. Xỉ lò cao cũng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao cường độ, trong khi tác dụng của tro bay thể hiện rõ rệt ở tuổi dài hạn. Việc giảm tỷ lệ nước/xi măng (N/X) giúp cải thiện cường độ nhưng đồng thời làm suy giảm tính công tác, đòi hỏi sự điều chỉnh hợp lý trong thiết kế cấp phối. Phân tích hồi quy tuyến tính bội cho phép xây dựng mô hình dự báo cường độ với mức độ tin cậy cao, đồng thời chứng minh tác động hiệp đồng giữa loại phụ gia khoáng sử dụng và tỷ lệ N/X. Kết quả nghiên cứu không chỉ mở ra hướng khai thác tiềm năng của cát biển mà còn góp phần giảm thiểu tác động môi trường, từ đó thúc đẩy quá trình phát triển xây dựng bền vững tại các khu vực ven biển.

Từ khóa: Cát thạch anh biển, tro bay, muối silic, xỉ lò cao, vữa cát thạch anh biển, đặc tính cơ học.

1. Tổng quan chung

Trong bối cảnh nguồn cát sông ngày càng cạn kiệt và nhu cầu xây dựng bền vững gia tăng, việc khai thác và sử dụng cát biển đã thu hút sự quan tâm rộng rãi như một giải pháp thay thế tiềm năng cho cát sông [1], [2], [3]. Cát biển phân bố phổ biến ở các vùng ven bờ, song lại tiềm ẩn nhiều hạn chế như hàm lượng muối cao, tạp chất hữu cơ và thành phần hạt mịn. Đặc biệt, sự hiện diện của ion clorua (Cl^-) có thể phá vỡ màng thụ động của cốt thép, thúc đẩy ăn mòn điện hóa, làm suy giảm tiết diện chịu lực và rút ngắn tuổi thọ kết cấu. Ngoài ra, muối còn ảnh hưởng đến quá trình thủy hóa,

gây ninh kết sớm nhưng làm giảm cường độ dài hạn, cũng như gia tăng hiện tượng hút ẩm và phún hóa bề mặt. Do đó, việc xử lý để giảm hàm lượng muối xuống ngưỡng cho phép theo tiêu chuẩn kỹ thuật (TCVN 7570:2006, ASTM C33) là yêu cầu bắt buộc trước khi đưa cát biển vào sản xuất vật liệu xây dựng [4].

Nhiều công trình đã chứng minh rằng việc sử dụng phụ gia khoáng có thể khắc phục các nhược điểm này, đồng thời cải thiện đáng kể tính công tác, cường độ và độ bền của vữa và bê tông. Tro bay (TB) giúp giảm nhiệt thủy hóa và cải thiện tính thi công; xỉ lò cao nghiền mịn (XLC) góp phần nâng

cao cường độ dài hạn; muối silic (MS) với kích thước hạt siêu mịn giúp lấp đầy lỗ rỗng và tăng khả năng chịu nén. Khi được phối trộn hợp lý, các phụ gia này tạo ra hiệu ứng cộng hưởng, nâng cao cả tính cơ học lẫn độ bền lâu dài [5], [6], [7], [8], [9]. Đồng thời, việc sử dụng phụ gia hóa dẻo còn giúp giảm tỷ lệ nước/xi măng (N/X) mà không ảnh hưởng đến tính công tác, qua đó tăng cường độ và cắt giảm phát thải CO₂, góp phần hướng tới phát triển bền vững [10].

Tính mới của nghiên cứu này nằm ở việc giải quyết những thách thức đặc thù của cát thạch anh biển (CTA) khu vực Nam Trung Bộ. Nguồn vật liệu này có ba đặc điểm đáng lưu ý: (i) mô đun độ lớn thấp (~1.4–2.0), gây khó khăn cho tính công tác; (ii) hàm lượng SiO₂ tinh khiết cao, làm tăng nguy cơ phản ứng kiềm-silic (ASR); và (iii) bối cảnh khan hiếm cát sông trong nước, thúc đẩy nhu cầu cấp thiết về vật liệu thay thế. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung đánh giá ảnh hưởng của loại và hàm lượng phụ gia khoáng, cùng với tỷ lệ N/X, đến tính công tác và cường độ nén của vữa CTA sau xử lý

rửa mặn. Các khía cạnh liên quan đến độ bền lâu dài (ăn mòn cốt thép, ASR) chỉ được thảo luận ở mức định hướng và không nằm trong phạm vi phân tích định lượng.

Nghiên cứu cũng hướng đến việc cung cấp những minh chứng khoa học cho khả năng ứng dụng CTA trong sản xuất vữa không chứa cốt thép ứng dụng trong xây dựng công trình, đặc biệt tại các khu vực ven biển nơi nguồn CTA dồi dào. Việc tận dụng loại cát này không chỉ giúp giảm áp lực khai thác cát sông mà còn đóng góp vào mục tiêu bảo tồn tài nguyên, cắt giảm phát thải và thúc đẩy phát triển hạ tầng theo hướng xanh, tuần hoàn.

2. Thực nghiệm

2.1. Vật liệu

2.1.1. Xi măng

Xi măng PC50, do Công ty Xi măng Hà Tiên cung cấp, được lựa chọn làm chất kết dính trong nghiên cứu này. Xi măng này thuộc loại I và đáp ứng tiêu chuẩn ASTM C1157. Bảng 1 cung cấp thông tin chi tiết về thành phần hóa học và các đặc tính vật lý của xi măng.

Bảng 1. Thành phần hóa học và khoáng vật của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

Thành phần oxit	PC (%)	TB (%)	XLC (%)	MS (%)	CTA (%)
SiO ₂	20,8	39,8	34,4	95,3	97,0
Al ₂ O ₃	5	21,5	9,0	0,6	1,2
Fe ₂ O ₃	3,5	13,7	2,58	0,3	0,25
CaO	64,3	15,2	44,8	0,3	0,45
MgO	1,5	2,8	4,43	0,4	0,16
Na ₂ O	0,1	1,1	0,62	0,3	0,28
K ₂ O	0,6	2	0,5	0,8	0,41
P ₂ O ₅	–	0,2	–	1,2	0,02
TiO ₂	–	0,4	–	–	0,09
MnO ₂	–	0,1	–	–	–
SO ₃	2,6	2,4	2,26	0,2	–
CaO free	0,7	2,2	–	–	–
Tổn thất khi nung (LOI)	1,4	0,1	–	1,2	–
Độ mịn của Blaine, cm ² /g	3971	5635	5992	17500	–
Cường độ nén ở ngày 28, MPa	55.2	–	–	–	–
Chỉ số pozzolanic ở ngày 28, %	–	86,6	102,1	125,7	–
Khối lượng riêng, g/cm ³	3,1	2,28	2,79	2,24	2,57
C ₃ S	54,8	–	–	–	–
C ₂ S	18,3	–	–	–	–
C ₃ A	7,3	–	–	–	–
C ₄ AF	10,7	–	–	–	–



Hình 1. Vật liệu dùng cho kế hoạch nghiên cứu

Hình 1 mô tả các vật liệu xi măng được sử dụng trong nghiên cứu.

2.1.2. Phụ gia khoáng

Trong nghiên cứu này, nguồn tro bay được lấy từ quá trình đốt than tại nhà máy nhiệt điện. Thành phần hóa học cùng các đặc tính vật lý chủ yếu của vật liệu này được thể hiện trong Bảng 1. TB được phân loại là nhóm F do tổng hàm lượng oxit $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lớn hơn 70%. Các khoáng chất chính trong tro bay bao gồm thạch anh (SiO_2) khoảng 6%, mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) khoảng 8%, hematite (Fe_2O_3) khoảng 4%, và gmelinite ($\text{K}_{7.72}\text{Si}_{7.4}\text{O}_{48} (\text{H}_2\text{O})_{12.84}$) khoảng 2%. Hình ảnh của TB được minh họa trong Hình 1.

Muội silic (MS) loại 940U của Eklem Silicon Materials đã được sử dụng, với các thành phần hóa học và vật lý được thể hiện tại Bảng 1, hình ảnh minh họa trong Hình 1. Bên cạnh đó, xỉ lò cao nghiền mịn (XLC), một sản phẩm phụ từ ngành công nghiệp thép do Công ty Hòa Phát, Việt Nam sản xuất, cũng được đưa vào nghiên cứu. Thành phần hóa học và các đặc tính cơ lý của XLC được tổng hợp trong Bảng 1, hình ảnh minh họa vật liệu được trình bày ở Hình 1.

2.1.3. Cốt liệu mịn

Khu vực Nam Trung Bộ có nguồn cung cấp

dồi dào CTA với mô đun độ lớn là 1,4. Thành phần hóa học của CTA được trình bày trong Bảng 1.

Để đảm bảo chất lượng cốt liệu đầu vào phù hợp cho vữa xây dựng và loại bỏ các tạp chất có hại, CTA được xử lý sơ bộ để đáp ứng các giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 và ASTM C33. Quy trình xử lý được thực hiện qua hai bước: Bước thứ nhất, sàng lọc để loại bỏ tạp chất như san hô, vỏ sò, nylon và các mảnh vụn khác; Sau đó, rửa bằng nước nóng ở nhiệt độ 90–95°C. Quy trình rửa được thực hiện bằng cách lấy 5 kg CTA, bổ sung lượng nước nóng tương đương khối lượng mẫu, khuấy đều trong vòng 10 phút. Sau giai đoạn này, CTA tiếp tục được làm sạch bằng nước thường để loại bỏ các tạp chất còn lại. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng kỹ thuật này giúp giảm đáng kể hàm lượng tạp chất có hại trong CTA, đáp ứng tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 và ASTM C33. Hình ảnh của CTA sau xử lý được minh họa trong Hình 1.

2.1.4. Phụ gia hóa học

Phụ gia hóa dẻo (SP) được chọn là Sika Viscocrete 8565, một loại phụ gia siêu dẻo gốc polymer. Phụ gia này có khả năng giảm nước cao, duy trì độ sụt trong hơn 90 phút, không chứa clorua và các chất ăn mòn, với tỷ trọng 1,04–1,07 g/cm³ và pH từ 3,8 đến 5,7. Liều lượng sử dụng của SP

là 0,8 % theo tổng khối lượng chất kết dính.

2.2. Tính toán khối lượng vật liệu thành phần

Để tối ưu hóa cấu trúc vữa, cần giảm thiểu các khoảng rỗng giữa những hạt vật liệu, dựa trên nguyên lý về sự sắp xếp chặt khít của hỗn hợp thành phần. Cách tiếp cận này không chỉ nâng cao độ bền cơ học mà còn góp phần cải thiện đáng kể chất lượng vữa trong suốt quá trình sử dụng. Vữa có thể được xem như một hệ đồng nhất, trong đó các hạt cốt liệu với kích thước khác nhau được gắn kết bởi hồ xi măng. Hồ xi măng đóng vai trò lấp đầy khoảng rỗng giữa các hạt cốt liệu đồng thời tạo nên lớp màng bao phủ và bảo vệ chúng. Một trong những thông số quan trọng khi thiết kế vữa là độ dày của lớp hồ xi măng bọc quanh bề mặt cốt liệu, yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến tính chất cơ học và độ bền lâu của vật liệu. Độ dày lớp bao phủ này, ký hiệu là t , được xác định thông qua hiệu số giữa thể tích hồ xi măng (V_{hx}) và thể tích lỗ rỗng giữa các hạt (V_r), sau đó chia cho tổng diện tích bề mặt của cốt liệu (S_{ud}). Mỗi quan hệ này được biểu diễn ở phương trình (1), đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá và kiểm soát chất lượng của hỗn hợp vữa.

$$t = \frac{V_{hx} - V_r}{S_{ud}} \quad (1)$$

Từ phương trình (1), thành phần cấp phối được xác định dựa trên phương pháp thể tích tuyệt đối, thông qua các biểu thức (2)-(7).

$$1 = V_{ct} + V_{hx,r} + V_{hx,b} \quad (2)$$

$$V_{ct} = \frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \dots + \frac{m_n}{\rho_n} \quad (3)$$

$$V_{hx,r} = \varepsilon(1 - V_{ct}); \quad \varepsilon = \frac{V_r}{V_{tp}} \quad (4)$$

$$V_{hx,b} = t \frac{S_{ud}}{M}; \quad M = m_1 + m_2 + \dots + m_n \quad (5)$$

$$V_{hx} = V_{hx,r} + V_{hx,b} = X \left(\frac{N}{X} + \frac{1}{\rho_x} \right) \quad (6)$$

$$r_1 = \frac{m_1}{M}; \quad r_2 = \frac{m_2}{M}; \dots; \quad r_n = \frac{m_n}{M} \quad (7)$$

Trong đó: V_{ct} – thể tích hạt cốt liệu, m^3 ; $V_{hx,r}$ – thể tích hồ xi măng điền đầy lỗ rỗng trong cốt liệu, m^3 ;

$V_{hx,b}$ – thể tích hồ bao phủ hạt cốt liệu, m^3 ; m_i – khối lượng của cốt liệu thứ i trong $1 m^3$ hỗn hợp bê tông, kg ; ρ_i – khối lượng riêng thực của hạt cốt liệu thứ i , kg/m^3 ; V_r – thể tích lỗ rỗng, m^3 ; V_{tp} – tổng thể tích chiếm chỗ của hỗn hợp cốt liệu, m^3 ; h – chiều dày hiệu dụng của lớp hồ bao phủ hạt cốt liệu, μm ; S_{ud} – giá trị bề mặt riêng của tổ hợp cốt liệu, m^2/kg ; ρ_x – khối lượng riêng thực của xi măng, kg/m^3 ; r_i – tỷ lệ khối lượng của cốt liệu thứ i ; N/X – tỷ lệ nước/xi măng.

2.3. Phương pháp thực nghiệm

Để đảm bảo tính chính xác của tỷ lệ N/X trong thực tế, độ ẩm của CTA được xác định trước mỗi mẻ trộn theo tiêu chuẩn ASTM C566. Lượng nước trộn và khối lượng cốt liệu sau đó được hiệu chỉnh tương ứng: lượng nước thêm vào được giảm đi đúng bằng lượng nước có trong cát, và khối lượng cát cân được tăng lên để đảm bảo thành phần cốt liệu khô trong cấp phối là không đổi.

Hỗn hợp vữa sau khi được trộn đều sẽ bắt đầu được thí nghiệm xác định độ chảy xòe theo tiêu chuẩn ASTM C1437 và ASTM C230, thí nghiệm này đo lường khả năng chảy tự do theo phương ngang của hỗn hợp vữa bằng cách sử dụng côn sụt tiêu chuẩn. Tiếp theo, các khuôn có kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm sẽ được sử dụng để tạo mẫu dùng cho việc xác định cường độ kéo uốn theo tiêu chuẩn ASTM C348 và cường độ nén theo tiêu chuẩn ASTM C349. Sau khi hoàn tất quá trình đúc, các mẫu được bảo dưỡng trong phòng có điều kiện kiểm soát, với nhiệt độ duy trì ổn định ở mức $23 \pm 2^\circ C$, sau đó được quấn bằng nylon. Sau một ngày các mẫu được tháo khuôn và bảo dưỡng trong nước cho đến ngày thực hiện thí nghiệm.

Đối với mỗi cấp phối, ba mẫu lăng trụ $40 \times 40 \times 160$ mm được đúc cho từng tuổi thí nghiệm. Giá trị cường độ kéo uốn là trung bình của ba mẫu, trong khi giá trị cường độ nén là trung bình của sáu nửa mẫu còn lại sau khi thử uốn, tuân theo tiêu chuẩn ASTM C349.

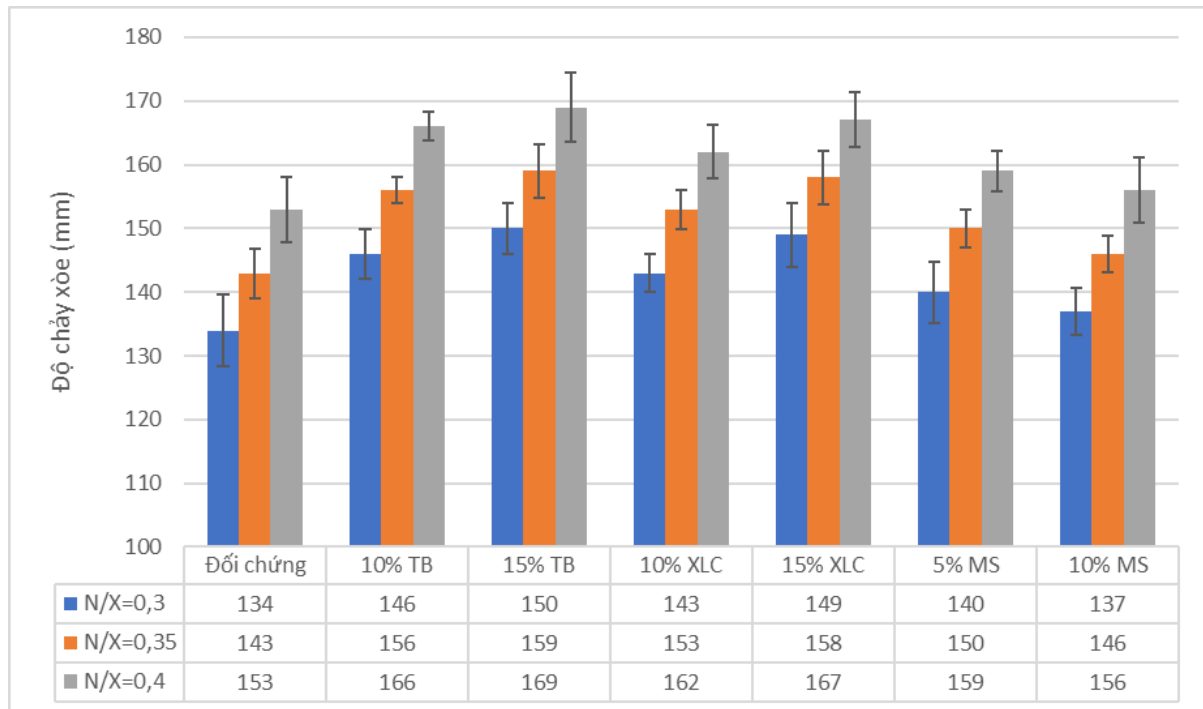
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Độ chảy xòe

Tính công tác của vữa CTA được xác định thông qua chỉ số độ chảy xòe, một thông số then

chốt phản ánh khả năng thi công, mức độ đầm chặt và chất lượng hoàn thiện bề mặt. Trong nghiên cứu này, độ chảy xòe của vữa được khảo sát ở các tỷ lệ N/X lần lượt là 0,30, 0,35 và 0,40, với sự kết

hợp của các phụ gia khoáng gồm TB, XLC và MS. Kết quả được minh họa trong Hình 2 cho thấy độ chảy xòe biến đổi đáng kể tùy theo tỷ lệ N/X cũng như loại và hàm lượng phụ gia được sử dụng.



Hình 2. Độ chảy xòe của các mẫu vữa thí nghiệm

Ở tỷ lệ N/X là 0,30, mẫu đối chứng (không có phụ gia) đạt độ chảy xòe 134 mm. Khi N/X tăng lên 0,35 và 0,40, giá trị này lần lượt tăng lên 143 mm và 153 mm, cho thấy sự phụ thuộc trực tiếp của độ chảy xòe vào hàm lượng nước trộn. Việc bổ sung TB và XLC cải thiện rõ rệt khả năng làm việc của hỗn hợp ở cả ba mức N/X. Cụ thể, với N/X là 0,30, khi bổ sung 10% và 15% TB, độ chảy xòe tăng lên tương ứng 146 mm và 150 mm. Sự cải thiện này có thể lý giải bởi hình dạng hạt cầu cùng kích thước nhỏ mịn của TB, giúp giảm ma sát giữa các hạt và tăng tính linh động của hỗn hợp [11]. XLC cũng mang lại hiệu quả tương tự; ở tỷ lệ N/X là 0,35, hỗn hợp chứa 15% XLC đạt độ chảy xòe 158 mm. Ngược lại, ảnh hưởng của MS đến độ chảy xòe hạn chế hơn. Do kích thước hạt cực mịn, MS làm tăng nhu cầu nước, từ đó giảm hiệu quả cải thiện độ chảy xòe. Ở N/X là 0,40, hỗn hợp chứa 10% MS đạt độ chảy xòe 156 mm, chỉ cao hơn nhẹ so với 153 mm của mẫu đối chứng. Những kết quả này khẳng định vai trò quan trọng của việc lựa chọn loại phụ gia cũng như xác định tỷ lệ N/X tối ưu để đạt

được tính công tác theo yêu cầu thiết kế.

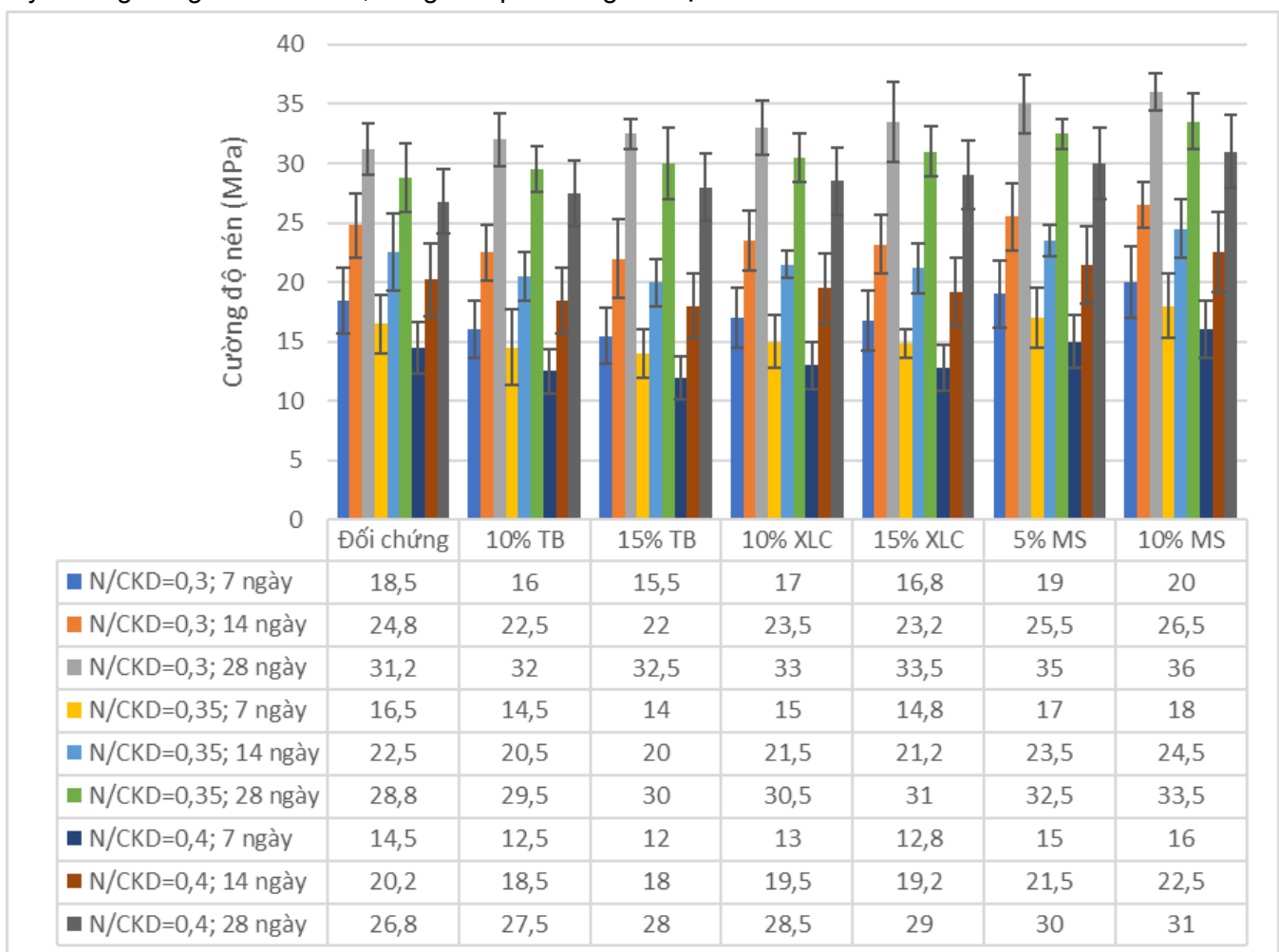
3.2. Cường độ nén và kéo uốn

Kết quả thí nghiệm nén và uốn được trình bày ở **Hình 3** và **Hình 4**.

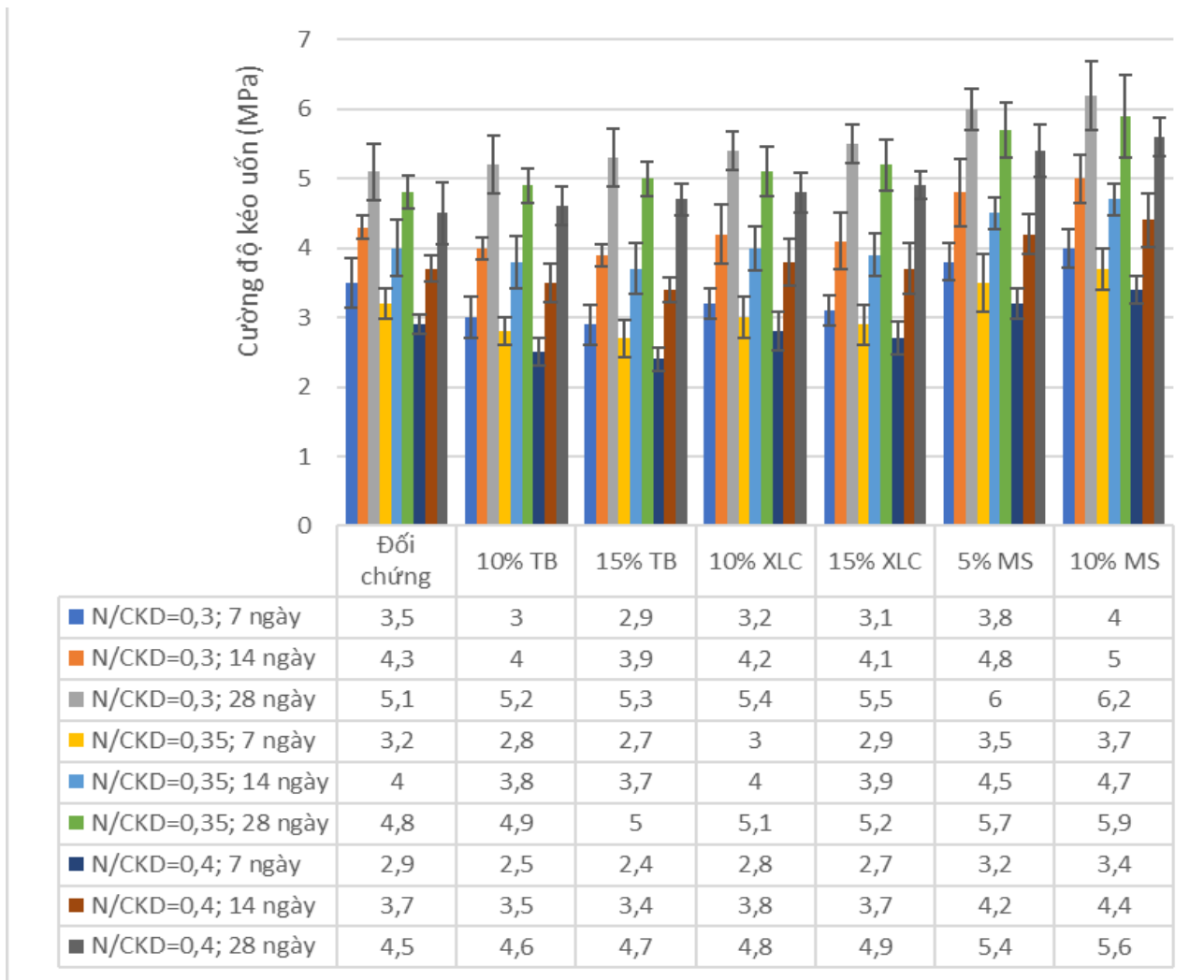
Khi tỷ lệ N/X tăng từ 0,30 đến 0,40, cường độ chịu nén của VCTA tại các tuổi 7, 14 và 28 ngày đều giảm rõ rệt. Nguyên nhân chính là do hàm lượng nước lớn hơn dẫn đến hình thành nhiều lỗ rỗng mao quản, làm suy yếu cấu trúc nền xi măng hydrat hóa và giảm khả năng chịu lực của vật liệu. Xu hướng này nhất quán với các nghiên cứu trước đây về ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến tính chất cơ học của vữa và bê tông [12]. Khi thay thế một phần xi măng bằng 10% hoặc 15% TB, cường độ nén ở 7 ngày tuổi thấp hơn mẫu đối chứng, do phản ứng pozzolan của TB diễn ra chậm, làm hạn chế sự phát triển cường độ sớm. Tuy nhiên, đến 28 ngày, cường độ của các mẫu chứa TB được cải thiện đáng kể và trong một số trường hợp còn vượt nhẹ so với mẫu đối chứng, chẳng hạn ở tỷ lệ N/X là 0,30 mẫu chứa 15% TB đạt 32,5 MPa, cao hơn mức 31,2 MPa của mẫu chuẩn. Sự cải thiện này

chủ yếu do phản ứng giữa TB và $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tạo ra các sản phẩm hydrat hóa thứ cấp, góp phần củng cố cấu trúc vữa [13]. Đối với XLC, ảnh hưởng tích cực rõ rệt hơn. Các mẫu chứa 10% và 15% XLC đều thể hiện cường độ nén cao hơn so với mẫu chứa TB ở cả ba mốc tuổi 7, 14 và 28 ngày. Đặc biệt, ở 28 ngày tuổi, mẫu có 15% XLC tại N/X là 0,30 đạt cường độ tối đa 33,5 MPa. Hiệu quả này được lý giải bởi hàm lượng CaO tương đối cao trong XLC, giúp thúc đẩy quá trình hydrat hóa và tạo thêm các sản phẩm C-S-H bền chắc [14]. MS cho thấy tác động mạnh mẽ nhất. Trong cả ba tỷ lệ N/X, các mẫu chứa 5% và 10% MS đều có cường độ nén cao hơn so với tất cả các nhóm còn lại. Đặc biệt, mẫu chứa 10% MS tại N/X là 0,30 đạt cường độ 36,0 MPa ở tuổi 28 ngày, cao hơn 15,4% so với mẫu đối chứng (31,2 MPa). Hiệu quả này bắt nguồn từ kích thước hạt siêu mịn của MS, giúp lấp đầy lỗ rỗng trong cấu trúc vữa, đồng thời phản ứng

pozzolanic mạnh mẽ tiêu thụ nhanh $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tự do và tạo thêm các sản phẩm hydrat hóa bền vững [15]. Khi tỷ lệ N/X tăng trong khoảng 0,30-0,40, các mẫu có chứa MS luôn đạt cường độ nén cao nhất, tiếp theo là XLC và cuối cùng là TB. Điều này cho thấy MS là phụ gia khoáng hiệu quả nhất trong việc nâng cao cường độ chịu nén của VCTA, đặc biệt ở giai đoạn đầu. Với cùng loại phụ gia, việc tăng hàm lượng từ 10% lên 15% (đối với TB và XLC) hoặc từ 5% lên 10% (đối với MS) chỉ mang lại sự gia tăng nhẹ về cường độ ở tuổi 28 ngày, cho thấy xu hướng cải thiện có dấu hiệu bão hòa tại mức thay thế cao hơn. Như vậy, MS được xem là lựa chọn tối ưu để nâng cao cường độ chịu nén, trong khi XLC thể hiện ưu thế rõ rệt hơn so với TB. Tuy nhiên, để đạt hiệu quả tối đa, cần xác định hợp lý tỷ lệ N/X cùng hàm lượng phụ gia, nhằm cân bằng giữa tính công tác và khả năng phát triển cường độ lâu dài của VCTA.



Hình 3. Kết quả thí nghiệm cường độ nén



Hình 4. Độ bền kéo uốn của các mẫu vữa ở các điều kiện thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ kéo uốn phụ thuộc đáng kể vào tỷ lệ N/X và loại phụ gia khoáng. Khi tỷ lệ N/X tăng từ 0,30 lên 0,40, cường độ kéo uốn giảm từ 5,1 MPa xuống 4,5 MPa ở tuổi 28 ngày, tương ứng mức giảm 11,8%. Xu hướng này cũng xuất hiện ở các mẫu có phụ gia, với mức giảm dao động 9,6–13,2%. Nguyên nhân là tỷ lệ N/X cao làm suy yếu cấu trúc vi mô, gia tăng độ rỗng và giảm khả năng chịu kéo uốn, kể cả khi có phụ gia.

Đối với TB, ảnh hưởng phụ thuộc vào thời gian. Ở 7 ngày, các mẫu chứa 10% và 15% TB có cường độ kéo uốn thấp hơn mẫu đối chứng lần lượt 14,3% và 17,1%, do phản ứng pozzolanic chậm. Tuy nhiên, ở 28 ngày, cường độ tăng lên 5,2 MPa và 5,3 MPa, cao hơn đối chứng 2,0% và 3,9%, chứng tỏ TB có hiệu quả cải thiện về lâu dài, dù tác động ban đầu là tương đối hạn chế [11]. XLC

thể hiện hiệu quả cao hơn TB. Ở 7 ngày, mẫu chứa 15% XLC đạt 3,1 MPa, lớn hơn 6,9% so với mẫu 15% TB. Đến 28 ngày, giá trị này tăng lên 5,5 MPa, vượt mẫu đối chứng 7,8% và cao hơn mẫu 15% TB khoảng 3,8%. MS mang lại hiệu quả vượt trội nhất trong việc nâng cao cường độ kéo uốn. Ở 28 ngày, mẫu chứa 10% MS đạt 6,2 MPa, cao hơn đối chứng 21,6%, cao hơn mẫu 15% TB 17% và mẫu 15% XLC 12,7%. So với mẫu 5% MS (6,0 MPa), việc tăng hàm lượng lên 10% chỉ cải thiện thêm 3,3%, cho thấy hiệu ứng bão hòa bắt đầu xuất hiện. Tác động này có thể lý giải bởi kích thước hạt siêu mịn và phản ứng pozzolanic mạnh mẽ của MS [15], giúp lấp đầy lỗ rỗng, nâng cao độ đặc chắc và cải thiện vi cấu trúc của VCTA.

3.3. Phân tích tương quan ảnh hưởng của phụ gia đến đặc tính cơ học

Để khảo sát mức độ ảnh hưởng của từng loại

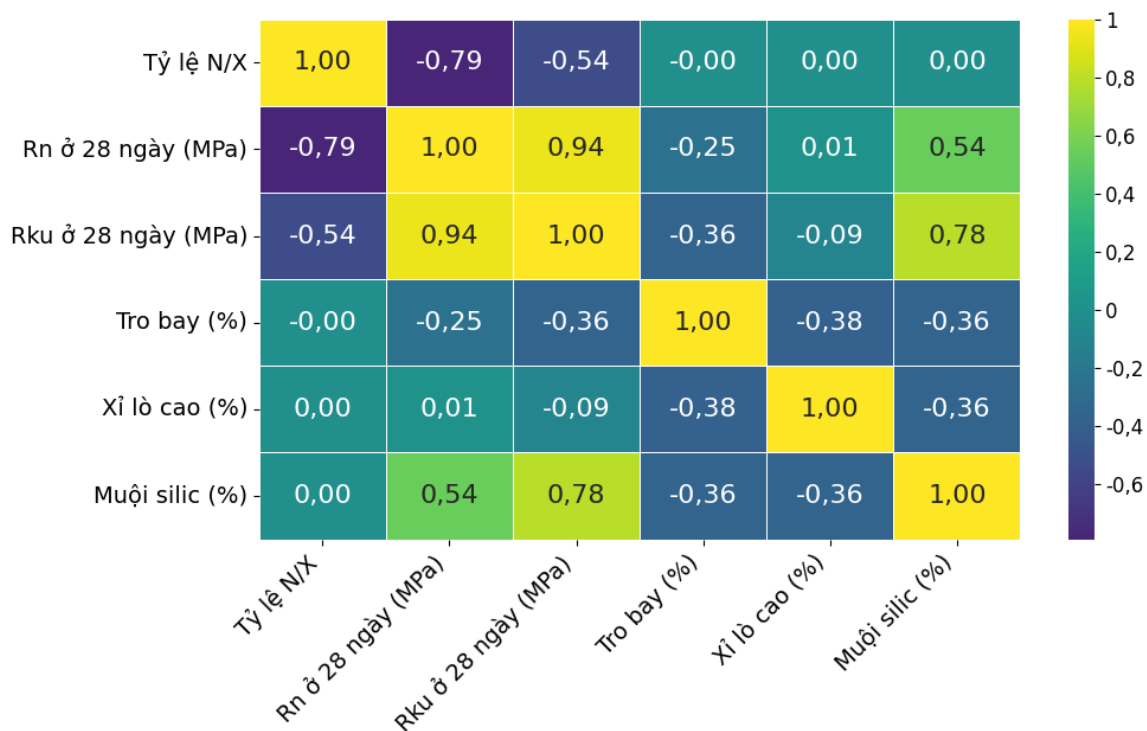
và lượng phụ gia khoáng đến cường độ nén và kéo uốn ở 28 ngày, phân tích tương quan Pearson đã được thực hiện. Công thức tính hệ số tương quan được thể hiện ở phương trình (8).

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

Trong đó, X_i và Y_i là các giá trị riêng lẻ của các biến được phân tích; $\bar{X}$ và $\bar{Y}$ là giá trị trung bình tương ứng. Hệ số tương quan r dao động trong khoảng từ -1 đến 1, phản ánh mức độ chặt chẽ và chiều hướng mối quan hệ giữa các biến. Khi r bằng 1, các biến có tương quan dương hoàn hảo; khi r là -1, các biến có tương quan âm hoàn hảo; còn giá trị gần 0 cho thấy mối quan hệ yếu.

Kết quả hệ số tương quan Pearson giữa loại và hàm lượng phụ gia khoáng với cường độ nén và cường độ kéo uốn ở tuổi 28 ngày được thể hiện

trong Hình 5. Phân tích cho thấy MS có mối tương quan mạnh nhất với cả hai chỉ tiêu cơ học. Giá trị tương quan dương cao phản ánh rằng việc gia tăng hàm lượng MS góp phần cải thiện rõ rệt cường độ, phù hợp với đặc tính hạt siêu mịn và hoạt tính pozzolanic mạnh của vật liệu này, giúp tăng mật độ cấu trúc và khả năng chịu lực của VCTA. Ngược lại, TB có mức tương quan thấp hơn. Mặc dù TB giúp cải thiện tính công tác và mang lại lợi ích về lâu dài, nhưng ở 28 ngày tuổi, hiệu quả về cường độ chưa rõ rệt như MS, do phản ứng pozzolanic diễn ra chậm, đòi hỏi thời gian dài hơn để phát huy. Trong khi đó, XLC thể hiện hệ số tương quan ở mức trung bình, cho thấy khả năng cải thiện cường độ khá tốt, nhưng chưa vượt trội bằng MS. Tuy nhiên, khi kết hợp cùng các phụ gia khác, XLC vẫn giữ vai trò quan trọng trong việc tăng cường cường độ cho VCTA.



Hình 5. Biểu đồ tương quan giữa phụ gia khoáng và cường độ

3.4. Phân tích hồi quy tuyến tính bội

Hồi quy tuyến tính bội là một công cụ hữu hiệu nhằm đánh giá mức độ phù hợp của mô hình hồi quy, đồng thời cải thiện độ chính xác trong dự báo. Bằng cách xem xét mối quan hệ giữa tỷ lệ N/X, độ chảy xèo và các loại phụ gia khoáng với cường độ của VCTA thông qua hệ số tương quan,

nghiên cứu cho thấy tất cả các biến độc lập đều tác động đáng kể đến cường độ, mặc dù mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố có sự khác biệt.

Để nâng cao khả năng dự báo, phương pháp hồi quy tuyến tính bội được áp dụng dựa trên dữ liệu thực nghiệm. Từ đó, một mô hình dự báo đã được xây dựng, cho phép đánh giá hiệu quả các

đặc tính cơ học của VCTA một cách tối ưu hơn. Biểu thức của mô hình hồi quy tuyến tính bội được thể hiện trong phương trình (9).

$$\begin{cases} f_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_k x_{1k} \\ f_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_k x_{2k} \\ \dots \\ f_n = \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_k x_{nk} \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó: f – biến phụ thuộc (f biểu thị cường độ); x – biến độc lập ($x_1, x_2, \dots, x_k$ biểu thị tỷ lệ N/X , độ chảy xòe, loại và lượng phụ gia khoáng); β – hệ số hồi quy; k – biến độc lập có các quan sát là ($x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, f_i$) ($i = 1, 2, \dots, n$).

Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính bội được thực hiện trong MATLAB, phương trình hồi quy tuyến tính bội của cường độ nén được biểu diễn theo phương trình (10) với R^2 là 0,91, còn đối với cường độ kéo uốn được thể hiện tại phương trình (11) với R^2 là 0,93.

$$f_{\text{nen}} = 44,0 - 31,66 \cdot N/X - 0,026 \cdot DCX + 0,145 \cdot PGK + 0,242 \cdot TB + 1,041 \cdot XLC + 3,319 \cdot MS \quad (10)$$

$$f_{\text{keo}} = 6,7 - 3,475 \cdot N/X - 0,004 \cdot DCX + 0,031 \cdot PGK - 0,05 \cdot TB + 0,115 \cdot XLC + 0,828 \cdot MS \quad (11)$$

Cần lưu ý rằng các phương trình hồi quy (10) và (11) được xây dựng trên cơ sở thực nghiệm và chỉ có giá trị dự đoán trong phạm vi các biến số đã được khảo sát. Cụ thể, phạm vi áp dụng của mô hình bao gồm: tỷ lệ N/X trong khoảng 0,30–0,40; hàm lượng TB và XLC từ 0% đến 15%; hàm lượng MS từ 0% đến 10%; và độ chảy xòe (DCX) giới hạn trong khoảng 130–170 mm. Tuy nhiên, không sử dụng các phương trình này để ngoại suy cho các giá trị nằm ngoài phạm vi trên, vì điều này có thể dẫn đến sai lệch trong dự đoán và gây ra rủi ro trong thiết kế. Mặc dù không phản ánh đầy đủ các cơ chế vi mô phức tạp của hệ vật liệu, mô hình vẫn đóng vai trò như một công cụ hữu ích trong việc đánh giá nhanh và hỗ trợ thiết kế cấp phối, góp phần tối ưu hóa chất lượng vữa/công trình trong điều kiện thực tế.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã tập trung đánh giá ảnh hưởng

của các phụ gia khoáng (tro bay, xỉ lò cao và muối silic) đến độ chảy xòe, cường độ nén và cường độ kéo uốn của vữa cát thạch anh biển (VCTA). Thông qua thí nghiệm và phân tích dữ liệu, nghiên cứu mang lại những nhận định ban đầu về tác động của từng loại phụ gia cũng như mối quan hệ giữa tỷ lệ nước/xi măng với các đặc tính cơ học của vật liệu. Các kết quả chính được rút ra như sau:

(1) Muối silic thể hiện hiệu quả vượt trội trong việc nâng cao cường độ nén và kéo uốn của VCTA, đặc biệt ở giai đoạn sớm. Xỉ lò cao cũng mang lại hiệu quả đáng kể trong việc cải thiện cường độ ban đầu, trong khi tro bay có tác động nhẹ đến cường độ ở 28 ngày tuổi và nổi trội hơn ở dài hạn.

(2) Phân tích tương quan cho thấy cường độ nén và kéo uốn có quan hệ thuận với hàm lượng phụ gia khoáng (đặc biệt là muối silic), trong khi tỷ lệ N/X có quan hệ nghịch với cả hai chỉ tiêu cơ học này. Sự thay đổi của N/X , hàm lượng muối silic và xỉ lò cao đều có ảnh hưởng rõ rệt đến cường độ của VCTA. Trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm, mô hình hồi quy tuyến tính bội đã được thiết lập để dự đoán cường độ nén và kéo uốn.

(3) Việc sử dụng cát thạch anh biển kết hợp với phụ gia khoáng có tiềm năng trở thành giải pháp thay thế nguồn cốt liệu tự nhiên đang dần suy giảm, đồng thời cung cấp một hướng đi bền vững và kinh tế cho sản xuất vữa không cốt thép tại các khu vực ven biển. Về khía cạnh môi trường, thay thế clinker bằng tro bay và xỉ lò cao (tới 15%) giúp giảm phát thải CO_2 từ quá trình sản xuất xi măng và tận dụng hiệu quả phế phẩm công nghiệp. Về khía cạnh cơ học - kinh tế, việc bổ sung 10% muối silic có thể nâng cường độ nén ở 28 ngày thêm 15,4%, cho phép giảm tổng lượng chất kết dính cần thiết, từ đó tiết kiệm xi măng và giảm thêm lượng phát thải carbon.

Kết quả này khẳng định tính bền vững của VCTA không chỉ ở phương diện định tính mà còn được lượng hóa rõ ràng thông qua giảm sử dụng tài nguyên nguyên sinh và hạn chế phát thải khí nhà kính. Hướng nghiên cứu tiếp theo nên tập trung vào việc kiểm soát hàm lượng ion Cl^- khi ứng dụng trong các kết cấu có cốt thép nhằm đảm bảo

độ bền lâu dài.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải trong Đề tài nghiên cứu khoa học trọng điểm cấp Trường mã số ĐTTĐ 2023-02.

Tài liệu tham khảo

- [1] L.V. Hùng, P.V. Quỳnh. (2021). Nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng cát biển làm cốt liệu cho bê tông. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng*, 11(1), 18-24. <https://doi.org/10.54772/jomc.1.2021.44>
- [2] N.T.N. Vân, N.Q. Phú. (2021). Nghiên cứu sử dụng cát biển và tro bay chế tạo bê tông Geopolymer. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 74, 62-66.
- [3] H.Q. Gia, T.K. Kiên. (2019). Thực trạng khai thác sử dụng cát tự nhiên tại Việt Nam và nghiên cứu tính chất cát biển tại một số vùng biển Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 66, 151-156.
- [4] N.Q. Phú, N.T. Lê. (2021). Nghiên cứu sử dụng cát biển, kết hợp tro bay và xỉ lò cao chế tạo bê tông Geopolymer ứng dụng cho các công trình thủy lợi. *Tạp chí Vật liệu xây dựng – Môi trường*, 3, 35-41.
- [5] L.V. Hùng, P.H. Thiên, P.V. Quỳnh, N.V. Hoan. (2022). Một số tính chất cơ học và độ bền lâu của bê tông sử dụng cát biển và tro bay. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 12(3), <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2022.307>
- [6] Đ.V. Phúc, N.T. Khoa. (2023). Nghiên cứu sử dụng cát nhiễm mặn dùng để chế tạo bê tông hạt nhỏ cho công trình ven biển không cốt thép ở khu vực Quảng Nam – Đà Nẵng. Đề tài Nghiên cứu khoa học.
- [7] H.V. Quân, N.T. Khoa, N.T. Sang. (2023). Đánh giá độ thấm clorua, hệ số suy giảm khuếch tán clorua và dự báo tuổi thọ của kết cấu bê tông ở môi trường biển với bê tông hạt nhỏ chứa tro bay và xỉ lò cao. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 21(11.2), 18-22.
- [8] A.M. Neville, J.J. Brooks. (1987). *Concrete Technology*. Longman Scientific & Technical.
- [9] M. Thomas. (2013). *Supplementary cementing materials in concrete*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/b14493>
- [10] N.X. Thắng, T.M. Đạt. (2023). Nghiên cứu tổng hợp phụ gia siêu dẻo polycarboxylate loại polyether (PCE) cho bê tông. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 14(1), 6-11. <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2024.602>
- [11] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol. (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1145-1151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.030>
- [12] S.B. Singh, P. Munjal, N. Thammishetti. (2015). Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 4, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.09.003>
- [13] Y. Kocak, S. Nas. (2014). The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*, 73, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.048>
- [14] R. Siddique, R. Bennacer. (2012). Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.002>
- [15] G.A. Rao. (2003). Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1765-1770. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00171-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00171-6)