

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Nghiên cứu ứng dụng geopolimer trong phát triển vật liệu đất không nung

Research on the application of geopolimer in the development of unfired earth-based construction materials

➤ **THS.NCS Bùi Thanh Bảo***, **PGS.TS Bùi Quốc Bảo**, **PGS.TS Trần Minh Tùng**

Trường Đại học Tôn Đức Thắng

*Email: 221904001@student.tdtu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 13/5/2026

Ngày sửa bài: 21/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 02/6/2026

Ngày xuất bản Online: 07/6/2026

Tác giả liên hệ:

Email: 221904001@student.tdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Với việc ngày càng khan hiếm của nguồn cát xây dựng, vật liệu đất không nung đang được nghiên cứu, phát triển và tối ưu hóa. Xi măng thường được sử dụng để cải thiện cường độ và độ bền theo thời gian của vật liệu. Tuy nhiên, quá trình sản xuất xi măng phát thải lượng lớn khí CO₂, gây tác động đáng kể đến môi trường và biến đổi khí hậu. Do đó, việc nghiên cứu các chất kết dính thân thiện môi trường hơn nhằm thay thế một phần hoặc hoàn toàn xi măng đang thu hút nhiều sự quan tâm, trong đó geopolimer được xem là một giải pháp tiềm năng. Nghiên cứu này đánh giá khả năng ứng dụng geopolimer trong phát triển vật liệu đất không nung chế tạo theo phương pháp nén tĩnh (CEBs). Đất sử dụng được lấy tại TP Hồ Chí Minh. Tro bay loại F được sử dụng làm nguồn aluminosilicate để tổng hợp geopolimer. Các mẫu đất được phối trộn với geopolimer ở hàm lượng 6% và 10%, bảo dưỡng ở nhiệt độ thường, sau đó thí nghiệm nén một trục tại 7, 14, 28 và 56 ngày. Kết quả cho thấy cường độ chịu nén tăng theo thời gian và hàm lượng geopolimer. Ở tuổi 28 ngày, mẫu chứa 10% geopolimer đạt cường độ khoảng 2,85 MPa, cao hơn 60% so với mẫu chứa 6% geopolimer. Sự gia tăng cường độ cho thấy geopolimer có khả năng cải thiện liên kết giữa các hạt đất, tăng cường độ của vật liệu. Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng sử dụng geopolimer như một chất kết dính thân thiện môi trường trong sản xuất vật liệu đất không nung, góp phần giảm sự phụ thuộc vào xi măng và hướng tới phát triển vật liệu xây dựng bền vững.

Từ khóa: Gạch đất không nung; gạch đất nén (CEBs); đất nén gia cường geopolymer; cường độ chịu nén.

ABSTRACT

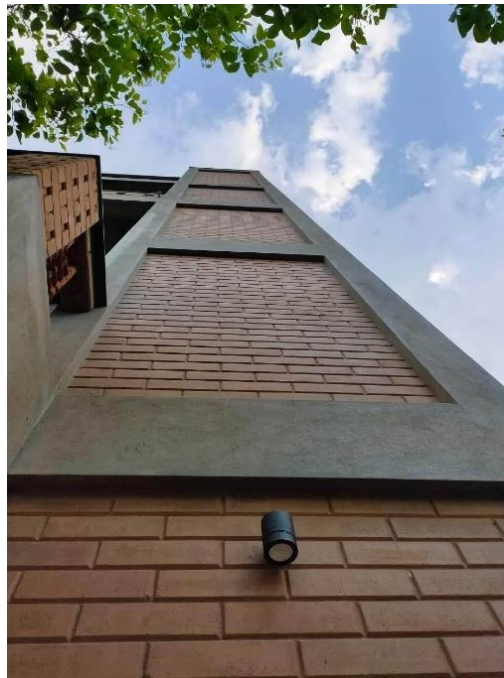
As construction sand becomes increasingly scarce, unfired earth materials have been investigated as an alternative construction material and further developed through material optimization. Cement is often added to improve their mechanical strength and long-term durability. However, cement production is associated with considerable CO₂ emissions, resulting in environmental impacts and contributing to climate change. For this reason, increasing attention has been given to alternative binders that can partially or fully replace cement, with geopolymer considered a viable option. This study examines the use of geopolymer in unfired earth materials produced by static compaction (CEBs). The earth was collected in Ho Chi Minh City, while Class F fly ash was used as the aluminosilicate precursor for geopolymer synthesis. Earth mixtures containing 6% and 10% geopolymer were prepared, cured under ambient conditions, and tested for unconfined compressive strength at 7, 14, 28 and 56 days. The results indicate that compressive strength increased with both curing age and geopolymer content. At 28 days, the mixture with 10% geopolymer achieved a compressive strength of about 2.85 MPa, approximately 60% higher than that of the mixture with 6% geopolymer. This improvement suggests that geopolymer contributes to stronger bonding between earth particles, thereby enhancing the strength of the material. Overall, the findings indicate that geopolymer can be used as a more environmentally friendly binder for unfired earth materials, helping to reduce cement consumption and support the development of sustainable construction materials.

Keywords: Unfired earth blocks; compressed earth blocks (CEBs); geopolymer stabilized compressed earth blocks; compressive strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh nguồn cát xây dựng ngày càng khan hiếm [1] và ngành công nghiệp xây dựng đang chịu áp lực lớn trong việc giảm phát thải khí nhà kính từ sản xuất vật liệu truyền thống như xi măng và gạch nung, các loại vật liệu đất không nung đang được quan tâm nghiên cứu, phát triển và tối ưu hóa như một giải pháp xây dựng bền vững [2, 3]. Trong số đó, vật liệu đất không nung được xem là một hướng tiếp cận tiềm năng nhờ khả năng tận dụng nguồn vật liệu địa phương, giảm tiêu thụ năng lượng và hạn chế tác động môi trường so với vật liệu nung truyền thống [4, 5].

Tuy nhiên, vật liệu đất truyền thống thường có hạn chế về cường độ cơ học, khả năng kháng nước và độ bền theo thời gian. Vì vậy, xi măng thường được sử dụng như một chất kết dính để cải thiện các tính chất cơ học và độ bền theo thời gian của vật liệu đất. Mặc dù vậy, quá trình sản xuất xi măng phát thải lượng lớn khí CO₂, gây ảnh hưởng đáng kể đến môi trường và góp phần thúc đẩy biến đổi khí hậu toàn cầu. Do đó, việc nghiên cứu các chất kết dính thân thiện môi trường hơn nhằm thay thế một phần hoặc hoàn toàn xi măng đang thu hút nhiều sự quan tâm, trong đó geopolymer được xem là một giải pháp tiềm năng [6].



Hình 1. Ngôi nhà được xây dựng bằng gạch đất nén tĩnh CEBs (<https://www.earthblocks.in/>)

Geopolymer là loại chất kết dính vô cơ được tổng hợp từ các nguồn aluminosilicate như tro bay, xỉ lò cao hoặc thủy tinh phế thải dưới tác dụng của dung dịch hoạt hóa kiềm [7]. Việc tận dụng các phụ phẩm công nghiệp để tổng hợp geopolymer còn góp phần giảm phát thải CO₂ và thúc đẩy xu hướng kinh tế tuần hoàn trong xây dựng. Các nghiên cứu gần đây cho thấy geopolymer có khả năng tạo ra cấu trúc gel đặc chắc, giúp cải thiện liên kết giữa các hạt đất, giảm độ hút nước và gia tăng đáng kể cường độ chịu nén của vật liệu đất không nung [8, 9].

Mặc dù tiềm năng ứng dụng của geopolymer trong vật liệu đất không nung là rất lớn, tính chất cơ học của vật liệu vẫn phụ thuộc mạnh vào đặc tính của đất địa phương, thành phần aluminosilicate và nồng độ dung dịch hoạt hóa kiềm. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá khả năng ứng dụng geopolymer trong phát triển vật liệu đất không nung chế tạo theo phương pháp nén tĩnh, tương tự quy trình sản xuất gạch đất không nung nén tĩnh (Compressed Earth Blocks - CEBs). Hình 1 giới thiệu một công trình sử dụng gạch đất nén tĩnh CEB tại Ấn Độ.

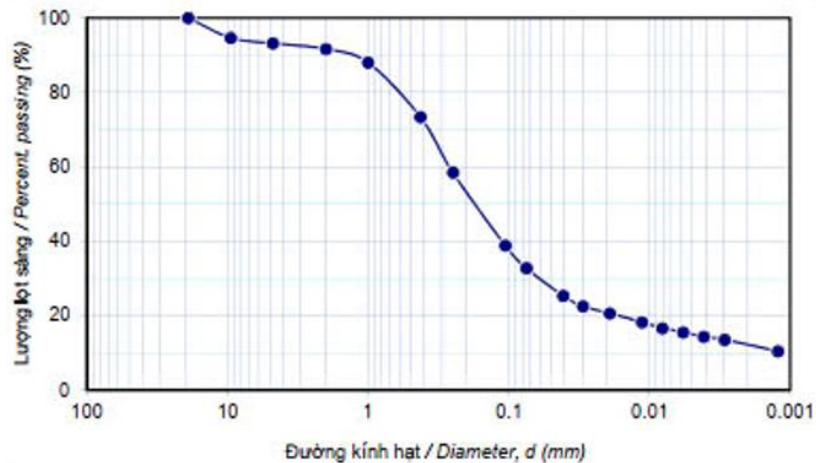
Kết quả nghiên cứu được kỳ vọng sẽ cung cấp cơ sở khoa học cho việc phát triển các loại vật liệu xây dựng xanh có hiệu năng cao, giảm phụ thuộc vào xi măng và hướng tới phát triển bền vững.

2. CHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu

2.1.1. Đất

Đất sử dụng trong nghiên cứu được lấy từ khu vực đào nền của một dự án đường giao thông tại TP Hồ Chí Minh. Nguồn đất này có thể được tái sử dụng làm vật liệu xây dựng thay vì thải bỏ, đặc biệt trong bối cảnh thiếu hụt cát. Mẫu đất được lấy ở độ sâu 0,5 - 1 m nhằm hạn chế chất hữu cơ. Thành phần hạt được xác định theo ASTM D422 (Hình 2). Tỷ trọng hạt và các chỉ tiêu dẻo được xác định theo ASTM D854 và ASTM D4318. Kết quả cho thấy đất có giới hạn chảy 22,2%, giới hạn dẻo 14,1% và chỉ số dẻo 8,1%, thuộc nhóm đất có tính dẻo trung bình.



Hình 2. Thành phần hạt của đất sử dụng trong nghiên cứu

2.1.2. Vật liệu chế tạo geopolymer

2.1.2.1. Trong bay (FA)

Bảng 1. Thành phần hóa học của tro bay sử dụng (% theo khối lượng)

| Thành phần | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Độ ẩm | LOI |
|-------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|-------|-----|
| % | 51,17 | 22,58 | 9,9 | 5,94 | 2,56 | 2,04 | 3,23 | 2,58 | 0,1 | 0,7 |
| LOI : mất khối lượng khi nung | | | | | | | | | | |

Geopolymer thường được tổng hợp bằng cách hoạt hóa các tiền chất aluminosilicate như tro bay, metakaolin hoặc đất sét tự nhiên bằng dung dịch kiềm. Trong nghiên cứu này, tro bay được chọn làm nguồn aluminosilicate do có sẵn ở Việt Nam, đặc biệt từ các nhà máy nhiệt điện than, góp phần tận dụng phụ phẩm công nghiệp và giảm tác động môi trường. Tro bay sử dụng được lấy từ Nhà máy Nhiệt điện DH3, tỉnh Trà Vinh. Theo ASTM C618-19 [10], vật liệu này được phân loại là tro bay loại F. Kết quả SEM cho thấy tro bay chủ yếu gồm các hạt hình cầu với kích thước khác nhau, đặc trưng cho vật liệu pozzolan. Kết quả phân tích thành phần hóa học của tro bay được trình bày ở Bảng 1.

2.1.2.2. Dung dịch kiềm hoạt hóa

Dung dịch kiềm hoạt hóa (Alkaline Activator Solution - AAS) sử dụng trong nghiên cứu gồm NaOH và Na₂SiO₃. NaOH tinh khiết 97%, khối lượng riêng 2,13 g/cm³ được sử dụng. Nồng độ NaOH đã được nghiên cứu phân tích trong các công bố trước đây của cùng nhóm nghiên cứu [7-9]. Mặc dù nồng độ NaOH cao hơn thường làm tăng cường độ geopolymer trong khoảng 7- 14 M, nồng độ trên 10 M không phù hợp cho ứng dụng quy mô lớn do chi phí, an toàn và có thể cản trở geopolymer hóa do dư ion hydroxide. Vì vậy, nồng độ NaOH 10 M đã được chọn trong nghiên cứu của bài báo này để đảm bảo đồng thời tính kỹ thuật, kinh tế và khả năng ứng dụng rộng rãi. NaOH rắn được thêm từ từ vào nước để kiểm soát phản ứng tỏa nhiệt và đảm bảo an toàn. Dung dịch bao gồm hòa tan 31,4% NaOH trong 68,6% nước.

Dung dịch Na₂SiO₃ thương mại gồm 19,3% Na₂O, 20,5% SiO₂ và 60,2% H₂O, khối lượng riêng 1,44 g/cm³. Các công bố trước đây của nhóm nghiên cứu đã chứng minh tỉ lệ tối ưu giữa Na₂SiO₃ và NaOH là 2,5, cho cường độ chịu nén của vữa geopolymer cao nhất. Sau khi pha chế, dung dịch kiềm hoạt hóa AAS được lưu giữ ở nhiệt độ phòng 24 giờ trước khi sử dụng.

2.1.2.3. Thành phần cấp phối geopolimer

Hiệu quả của chất kết dính geopolimer chịu ảnh hưởng lớn bởi tỷ lệ khối lượng giữa dung dịch hoạt hóa kiềm và tro bay. Theo các nghiên cứu trước, tỷ lệ AAS/FA xấp xỉ 0,40 được xem là phù hợp để đảm bảo đồng thời cường độ và tính công tác của hỗn hợp [7-9], [11, 12]. Khi tỷ lệ này tăng từ 0,4 lên 0,5, hỗn hợp có độ linh động cao hơn, với độ sụt tăng khoảng 10%. Tuy nhiên, cường độ chịu nén lại giảm ở mức tương ứng. Vì vậy, nghiên cứu này lựa chọn tỷ lệ AAS/FA = 0,40 cho cấp phối geopolimer.

Bên cạnh thành phần cấp phối, điều kiện dưỡng hộ cũng đóng vai trò quan trọng trong sự hình thành và phát triển cấu trúc geopolimer. Dưỡng hộ ở nhiệt độ cao, đặc biệt đến khoảng 90°C, có thể thúc đẩy phản ứng geopolimer hóa và nâng cao cường độ vật liệu. Tuy nhiên, nếu nhiệt độ quá cao, vật liệu có thể xuất hiện nứt vi mô, làm suy giảm tính chất cơ học. Do đó, trong nghiên cứu này, mẫu được dưỡng hộ ở điều kiện nhiệt độ môi trường, khoảng 28°C, nhằm hạn chế tiêu hao năng lượng và đánh giá khả năng áp dụng của vật liệu trong điều kiện thi công thông thường.

2.2. Chế tạo mẫu



Hình 3. Nén tĩnh trong quá trình chế tạo mẫu

Để tránh ảnh hưởng của vữa đến ứng xử cơ học của hệ gạch - vữa, nghiên cứu lựa chọn mẫu lăng trụ tròn, với tỷ số chiều cao/đường kính là 2, theo Tiêu chuẩn ASTM D2166. Mẫu đất nén có đường kính 5 cm, chiều cao 10 cm, được tạo hình bằng phương pháp nén tĩnh một lớp trên máy ép thủy lực, trong khuôn thép, mô phỏng quy trình sản xuất gạch đất nén CEBs. Hàm lượng nước tối ưu sử dụng là 10%.

Sau khi chế tạo, mẫu được bọc kín và dưỡng hộ ở 28°C, độ ẩm tương đối 70% trong 3 ngày nhằm hạn chế nứt do co ngót. Sau đó, mẫu được tháo bọc và tiếp tục bảo dưỡng trong cùng điều kiện.

2.3. Thí nghiệm nén một trục

Sự phát triển cường độ nén của mẫu được khảo sát thông qua thí nghiệm nén một trục tại các mốc tuổi 7, 14, 28 và 56 ngày sau khi tạo mẫu, như trình bày trong Hình 4. Ở mỗi mốc thí nghiệm, kết quả được lấy trung bình từ ba mẫu riêng biệt nhằm bảo đảm độ tin cậy của số liệu.



Hình 4. Thí nghiệm nén một trục mẫu đất nén

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

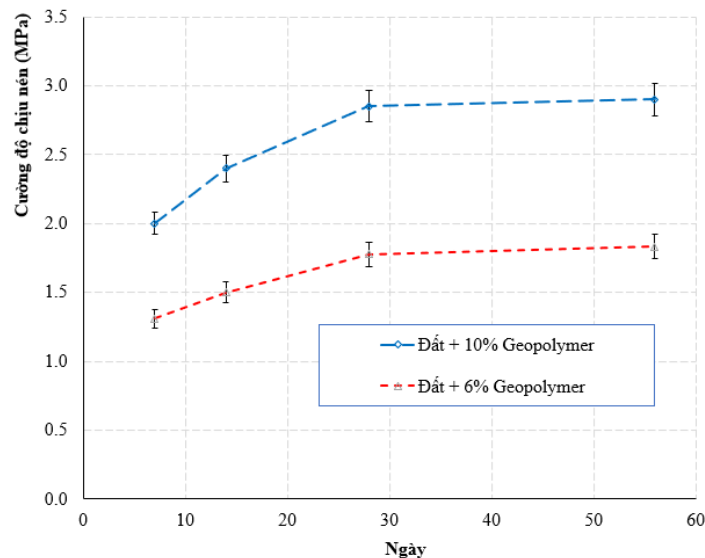
* Cường độ chịu nén của mẫu CEBs:

Sự phát triển cường độ nén của mẫu đất nén ổn định bằng 6% và 10% geopolymer được trình bày ở Hình 5. Kết quả cho thấy độ phân tán cường độ giữa các mẫu chế tạo trong phòng thí nghiệm thấp, với sai lệch dưới 5%.

Hình 5 cho thấy cường độ chịu nén của các mẫu đất gia cố geopolymer tăng theo thời gian dưỡng hộ ở cả hai hàm lượng 6% và 10%. Trong đó, mẫu sử dụng 10% geopolymer luôn đạt cường độ cao hơn rõ rệt so với mẫu 6% tại tất cả các tuổi thí nghiệm.

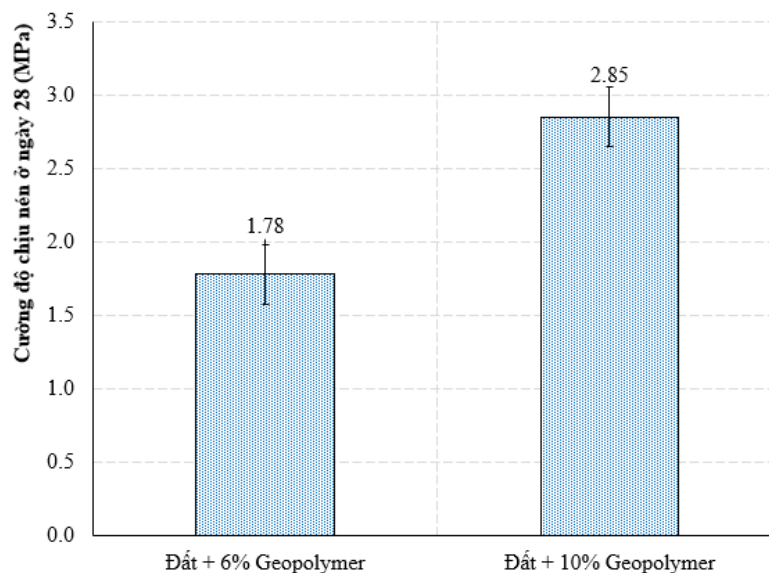
Với hàm lượng 6% geopolymer, cường độ tăng từ khoảng 1,3 MPa ở 7 ngày lên 1,8 MPa ở 28 ngày và gần như ổn định ở 56 ngày, đạt khoảng 1,85 MPa. Đối với mẫu 10% geopolymer, cường độ tăng từ khoảng 2,0 MPa ở 7 ngày lên 2,85 MPa ở 28 ngày và đạt xấp xỉ 2,9 MPa ở 56 ngày. Kết quả này cho thấy việc tăng hàm lượng geopolymer giúp cải thiện đáng kể khả năng liên kết, giảm độ rỗng và nâng cao độ đặc chắc của vật liệu.

Sự phát triển cường độ chủ yếu diễn ra trong 28 ngày đầu, do quá trình geopolymer hóa tạo thành các gel aluminosilicate lấp đầy lỗ rỗng và tăng cường liên kết trong cấu trúc đất nén. Sau 28 ngày, cường độ tăng không đáng kể, cho thấy phản ứng đóng rắn dần ổn định. Vì vậy, tuổi 28 ngày có thể được xem là mốc phù hợp để đánh giá cường độ chịu nén của vật liệu đất gia cố geopolymer chế tạo theo phương pháp CEBs.



Hình 5. Cường độ chịu nén của mẫu đất trộn geopolymer với hàm lượng lần lượt 6% và 10%

Hình 6 thể hiện cường độ chịu nén của mẫu đất gia cường geopolymer ở tuổi 28 ngày. Kết quả cho thấy, khi tăng hàm lượng geopolymer từ 6% lên 10%, cường độ chịu nén ở 28 ngày tăng 60%. Sự gia tăng này cho thấy hàm lượng geopolymer đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng chịu lực của vật liệu đất nén CEBs. Nguyên nhân là do khi hàm lượng geopolymer tăng, các tinh thể hình thành từ quá trình phản ứng geopolymer hóa hình thành nhiều hơn, giúp liên kết các hạt đất chặt chẽ hơn. Đồng thời, các gel aluminosilicate có khả năng lấp đầy lỗ rỗng trong cấu trúc vật liệu, làm tăng độ đặc chắc và giảm các khuyết tật bên trong mẫu [7]. Nhờ đó, khả năng truyền tải ứng suất và chống phá hoại của mẫu được cải thiện đáng kể.



Hình 6. So sánh cường độ chịu nén các mẫu CEBs ở ngày thứ 28

Trong nghiên cứu này, cường độ nén của các mẫu ổn định bằng 10% geopolymer ở 28 ngày là 2,85 MPa, là thấp hơn các loại gạch xi măng sử dụng phổ biến hiện nay trên thị trường. Mặc dù gạch ở Việt Nam được sử dụng chủ yếu cho các tường không chịu lực, cường độ chịu nén của gạch cũng là một trong những yếu tố ảnh hưởng đến việc lựa chọn của người sử dụng. Cường độ chịu nén của gạch đất nén trộn xi măng trong nghiên cứu này có thể do việc nén tĩnh một lớp của mẫu cao 15 cm chưa thể tạo

được một mẫu với độ đặc chắc đồng đều trên toàn bộ chiều cao mẫu, khác với việc đầm mẫu theo nhiều lớp, đặc trưng cho phương pháp xây dựng đất nện (rammed earth [8, 9]). Hơn nữa, nghiên cứu trình bày trong bài báo này không sử dụng nhiệt độ cao (60 – 90°C) cho quá trình dưỡng hộ. Việc sử dụng nhiệt độ cao cho dưỡng hộ giúp cải thiện các phản ứng polymer hoá, từ đó nâng cao cường độ chịu nén của vật liệu [12, 13], tuy nhiên quá trình này tiêu tốn nhiều năng lượng và đi kèm với tăng phát thải khí nhà kính để tạo ra nhiệt.

4. KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

4.1. Kết luận, kiến nghị

Nghiên cứu này đã đánh giá khả năng ứng dụng geopolimer làm chất kết dính thân thiện môi trường trong phát triển vật liệu đất không nung chế tạo theo phương pháp gạch đất nện tĩnh (CEBs). So với các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào vật liệu geopolimer thuần hoặc đất gia cố xi măng, nghiên cứu hiện tại tập trung vào việc sử dụng geopolimer để gia cố trực tiếp nguồn đất địa phương tại TP Hồ Chí Minh, qua đó góp phần làm rõ tiềm năng ứng dụng thực tế của geopolimer trong điều kiện vật liệu bản địa ở Việt Nam. Kết quả phân tích cho thấy loại đất sử dụng có thành phần hạt và tính dẻo phù hợp cho sản xuất CEBs, không chứa khoáng sét trương nở Montmorillonite, trong khi tro bay loại F có thể được tận dụng hiệu quả làm nguồn aluminosilicate để tổng hợp geopolimer.

Kết quả thí nghiệm nén một trục cho thấy cường độ chịu nén tăng theo thời gian dưỡng hộ và tăng đáng kể khi hàm lượng geopolimer tăng từ 6% lên 10%. Ở tuổi 28 ngày, mẫu chứa 10% geopolimer đạt cường độ khoảng 2,85 MPa, cao hơn khoảng 60% so với mẫu chứa 6% geopolimer. Kết quả này cho thấy geopolimer có khả năng cải thiện hiệu quả liên kết giữa các hạt đất thông qua quá trình hình thành gel aluminosilicate, giúp lấp đầy lỗ rỗng và tạo cấu trúc đặc chắc hơn cho vật liệu.

Một điểm mới đáng chú ý của nghiên cứu là việc đánh giá sự phát triển cường độ của vật liệu theo nhiều giai đoạn dưỡng hộ (7, 14, 28 và 56 ngày) đối với hệ vật liệu đất-geopolimer chế tạo bằng phương pháp nén tĩnh. Kết quả cho thấy tốc độ gia tăng cường độ sau 28 ngày không còn đáng kể, qua đó đề xuất tuổi 28 ngày là mốc phù hợp để đánh giá cường độ của loại vật liệu này. Ngoài ra, nghiên cứu cũng góp phần khẳng định khả năng thay thế một phần xi măng bằng geopolimer nhằm giảm phát thải CO₂ trong sản xuất vật liệu xây dựng không nung.

4.2. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Nhìn chung, hàm lượng 10% geopolimer cho hiệu quả gia cố tốt hơn so với 6%, cho thấy tiềm năng ứng dụng geopolimer trong phát triển vật liệu xây dựng xanh và bền vững. Tuy nhiên, để làm rõ hơn khả năng ứng dụng thực tế, các nghiên cứu tiếp theo cần khảo sát thêm ảnh hưởng của hàm lượng geopolimer tối ưu, độ hút nước, độ bền ngâm nước, co ngót, độ bền thời tiết và ứng xử của khối xây trong điều kiện làm việc thực tế. Đồng thời, cần thực hiện các nghiên cứu đánh giá vòng đời, phát thải CO₂ và chi phí sản xuất nhằm so sánh toàn diện với vật liệu đất gia cố xi măng truyền thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. Zhong, S. Deetman, A. Tukker et al. Increasing material efficiencies of buildings to address the global sand crisis. *Nat Sustain* 5, 389-392, 2022.

[2] M. Hall, R. Lindsay, M. Krayenhoff. *Modern Earth Buildings - Materials, Engineering, Constructions and Applications*. Woodhead Publishing, 800 p, 2012.

- [3] A. Fabbri, J.C. Morel, J.E. Aubert, Q.B. Bui, D. Gallipoli, B.V.V. Reddy, A. Ventura (Editors). Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements. State-of-the-Art Reports of the RILEM TC 274-TCE, Springer, ISBN: 978-3-030-83296-4, 293 p, 2022.
- [4] J.C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, P. Walker. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment* 36, 1119-26, 2001.
- [5] B.V. Venkatarama Reddy, P. Prasanna Kumar, Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. *Energy Build.* 42, 380-385, 2010.
- [6] Davidovits, J. Geopolymer chemistry and applications. Institut Géopolymère, 2008.
- [7] Le, H. B., Bui, Q. B., & Tang, L. Geopolymer recycled aggregate concrete: From experiments to empirical models. *Materials*, 14(5), 1180, 2021.
- [8] Ngo, T. P., Bui, Q. B., Phan, V. T. A., & Tran, H. B. Durability of geopolymer stabilised compacted earth exposed to wetting-drying cycles at different conditions of pH and salt, 2022.
- [9] Ngo, T. P., Phan, T. A. V., Schwede, D., Nguyen, D. M., & Bui, Q. B. Assessing influences of different factors on the compressive strength of geopolymer-stabilized compacted earth. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 58(2), 379-395, 2021.
- [10] ASTM International. ASTM C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, 2019.
- [11] Bui, Q. B., Nguyen, T. P., & Schwede, D. Manually compressed soil blocks stabilized by fly ash-based geopolymer: A promising approach for sustainable buildings. *Scientific Reports*, 13(1), 22905, 2023.
- [12] Miranda, T., Silva, R. A., Oliveira, D. V., Leitão, D., Cristelo, N., Oliveira, J., & Soares, E. ICEBs stabilised with alkali-activated fly ash as a renewed approach for green building: Exploitation of the masonry mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 155, 65-78, 2017.
- [13] Preethi, R. K., & Venkatarama Reddy, B. V. Experimental investigations on geopolymer stabilised compressed earth products. *Construction and Building Materials*, 257, 119563, 2020.