

A TYPICAL REVIEW ON GEOPOLYMERIZATION AND INFLUENTIAL FACTORS AFFECTING MECHANICAL PROPERTIES OF LATERITE SOILS STABILIZED WITH GEOPOLYMER

Bui Van Duc^{1,2*}, Nguyen Van Manh^{1,2}, Dao Phuc Lam³

¹Faculty of Civil Engineering - Hanoi University of Mining and Geology; ²Research Group GECS - Hanoi University of Mining and Geology; ³Faculty of Civil Engineering - University of Transport Technology, Hanoi

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	04/01/2023	In Vietnam, in recent years, research and application activities of geopolymer to improve the physical and mechanical properties of soil have increased, including weathered soils (laterite soils). However, critical studies on the polymerization process as well as the primary factors affecting the physico-mechanical properties of laterite soil are relatively limited. This paper presents a critical review on the polymerization mechanism, the influential factors affecting the mechanical properties of geopolymer materials. Specifically, the type or origin of AluminoSilicate materials and the alkaline environment play a vital role in the polymerization process. For the improvement of the physical and mechanical properties of soils with high clay/silt content and plasticity, beside using the appropriate sodium hydroxide (NaOH) concentration, other factors need to be considered, such as AluminoSilicate material content, Si/Al ratio. Besides, the strength of materials using geopolymer generally reaches the optimal value as the ratio Si/Al = (1.85±2.0); yet, there are still studies showing that the strength increases even when the ratio Si/Al ≥ 2.0; therefore, more studies need to be conducted to evaluate the influence of Si/Al ratio more clearly.
Revised:	23/5/2023	
Published:	23/5/2023	
KEYWORDS		
Geopolymer		
Soil Stabilization		
Alkali Solution		
Laterite Soil		
Mechanical Properties		

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ QUÁ TRÌNH POLYMER HÓA VÀ NHỮNG YẾU TỐ CHÍNH ẢNH HƯỞNG ĐẾN TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA ĐẤT LATERIT GIA CỐ BẰNG GEOPOLYMER

Bùi Văn Đức^{1,2*}, Nguyễn Văn Mạnh^{1,2}, Đào Phúc Lâm³

¹Khoa Xây dựng - Trường Đại học Mỏ - Địa chất; ²Nhóm nghiên cứu mạnh GECS - Trường Đại học Mỏ Địa chất; ³Khoa Công trình - Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	04/01/2023	Tại Việt Nam, trong những năm gần đây, hoạt động nghiên cứu, ứng dụng geopolymer để cải thiện tính chất cơ lý của đất nhận được khá nhiều sự quan tâm, trong đó có đất tàn tích (đất laterit). Tuy nhiên, các nghiên cứu tổng quát về quá trình polymer hóa cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ lý của đất laterit còn tương đối hạn chế. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phân tích tổng quát về cơ chế polymer hóa, các yếu tố chính ảnh hưởng tính chất cơ học của vật liệu geopolymer. Cụ thể, loại hay nguồn gốc vật liệu AluminoSilicate và môi trường kiềm đóng vai trò quan trọng trong quá trình polymer hóa. Đối với việc cải thiện tính chất cơ lý của các loại đất có hàm lượng bụi lớn và rất dẻo thì ngoài việc sử dụng nồng độ dung dịch kiềm NaOH phù hợp cũng cần phải xem xét đến các yếu tố khác, như hàm lượng vật liệu AluminoSilicate, tỷ số Si/Al... Bên cạnh đó, cường độ vật liệu sử dụng geopolymer nói chung đạt giá trị tối ưu khi tỷ số Si/Al = (1,85±2,0); tuy nhiên, một số nghiên cứu cho thấy cường độ tăng khi Si/Al ≥ 2,0; do đó, cần có thêm các nghiên cứu để đánh giá đầy đủ và rõ ràng hơn về ảnh hưởng của tỷ số Si/Al.
Ngày hoàn thiện:	23/5/2023	
Ngày đăng:	23/5/2023	
TỪ KHÓA		
Chất kết dính Geopolymer		
Gia cố vật liệu đất		
Dung dịch kiềm hóa		
Đất tàn tích		
Tính chất cơ học		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7200>

* Corresponding author. Email: bui vanduc@humg.edu.vn

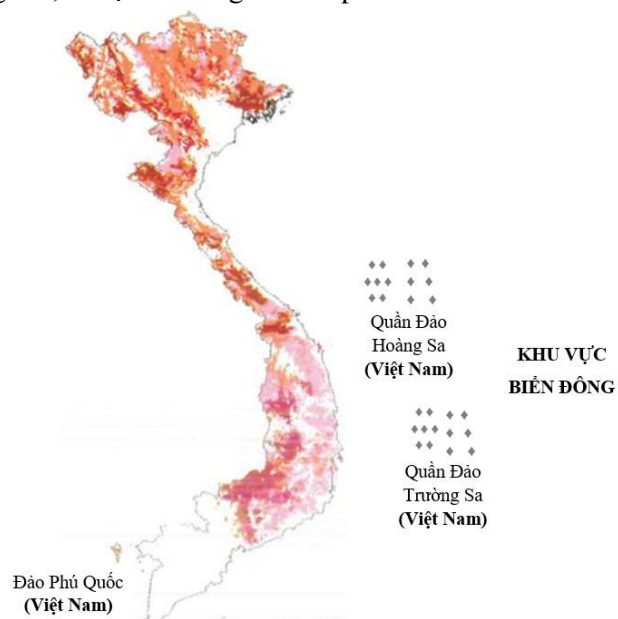
1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, Việt Nam và một số nước đang phát triển trên thế giới chịu nhiều áp lực trong quá trình đầu tư xây dựng các công trình xây dựng phục vụ phát triển kinh tế, xã hội, và an ninh quốc phòng; như ô nhiễm môi trường từ quá trình sản xuất vật liệu xi măng Portland, từ hoạt động sản xuất công nghiệp (công nghiệp luyện gang sử dụng lò cao, công nghiệp nhiệt điện than). Do đó, để giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường thì cần thiết phải có vật liệu mới thay thế một phần hoặc toàn bộ lượng xi măng Portland truyền thống. Bên cạnh đó, để giảm áp lực do khan hiếm nguồn vật liệu đất xây dựng có các chỉ tiêu cơ lý đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật phục vụ hoạt động xây dựng công trình thì đất tại chỗ đã được sử dụng, điển hình như với công trình đập. Tuy nhiên, một báo cáo cũng như kết quả nghiên cứu cho thấy đã có khá nhiều công trình xây dựng mất ổn định, hoặc thậm chí bị phá hoại liên quan đến việc sử dụng vật liệu đất đắp tại chỗ, đặc biệt khi đất có tính trương nở thể tích do sự có mặt của thành phần hạt mịn (hạt sét) trong đất [1] – [4]. Chính vì vậy, việc cải tạo tính chất cơ lý của vật liệu đất có ý nghĩa quan trọng trong việc kiểm soát sự ổn định và tuổi thọ của công trình xây dựng. Trong số các giải pháp đã và đang được nghiên cứu sử dụng để cải tạo tính chất xây dựng của vật liệu đất thì vật liệu mới - chất kết dính geopolymer theo Davidovist [5] hoặc chất kết dính kiềm hoạt hóa hàm lượng Canxi thấp theo Provis [6], [7] thay thế chất kết dính xi măng Portland truyền thống được xem là có tiềm năng cao trong việc đạt được mục tiêu kép: giảm ảnh hưởng môi trường do quá trình sản xuất công nghiệp và vật liệu xây dựng, giảm áp lực khan hiếm nguồn vật liệu đất có tính năng xây dựng tốt. Tại Việt Nam, cho đến nay, đã có một số công trình nghiên cứu và công trình khoa học sử dụng geopolymer cho các ứng dụng khác nhau, như: chế tạo vật liệu bê tông, vữa, gạch “xanh”, cải tạo đất yếu. Các công trình tiêu biểu bao gồm [8] – [13], cụ thể, công trình nghiên cứu [8] năm 2020 đã tiến hành ứng dụng thử nghiệm bê tông sử dụng chất kết dính kiềm hoạt hóa để thi công các cấu kiện lát mái bảo vệ đê biển tại Việt Nam, kết quả cho thấy tính khả thi cao của công nghệ sử dụng chất kết dính kiềm hoạt hóa, chất lượng hỗn hợp bê tông tốt, các chỉ tiêu cơ lý đạt theo yêu cầu bê tông dùng cho công trình thủy công. Một số tính chất của bê tông geopolymer tro bay ứng dụng cho kết cấu cầu hầm đã được thực hiện nghiên cứu tại Trường Đại học Giao thông Vận tải Hà Nội, kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy mô đun đàn hồi của bê tông geopolymer tro bay thấp hơn so với bê tông xi măng từ 10%-30%, nhưng cường độ kéo uốn cao hơn từ 7%-27%, bên cạnh đó, kết quả tính toán với dầm cầu T12m sử dụng bê tông geopolymer tro bay cũng cho thấy dầm đảo bảo cả hai điều kiện về cường độ và điều kiện về độ võng [9]. Tính chất của bê tông geopolymer tro bay cốt liệu xi thép trong xây dựng mặt đường ô tô ở Việt Nam đã được Trịnh Hoàng Sơn nghiên cứu năm 2020, kết quả cho thấy xi thép Thái Nguyên đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật để làm cốt liệu và có thể thay thế hoàn toàn cho cốt liệu tự nhiên để chế tạo bê tông geopolymer, đồng thời một số tính chất chủ yếu của bê tông geopolymer tro bay sử dụng thay thế cốt liệu xi thép, như: *vi cấu trúc, tính công tác, thời gian đông kết, cường độ chịu nén, chịu kéo uốn, mô đun đàn hồi, độ mài mòn, co ngót và giãn nở do nhiệt* đã được nghiên cứu đánh giá, đặc biệt nghiên cứu này đã đề xuất được phương pháp thiết kế thành phần cấp phối và kết cấu mặt đường cứng sử dụng bê tông geopolymer tro bay trong xây dựng mặt đường ở Việt Nam [10]. Nghiên cứu sử dụng gia cố đất sét yếu tại Việt Nam bằng công nghệ geopolymer sử dụng tro bay Vĩnh Tân cũng đã được tác giả Trần Văn Thu, Trường Đại học Bách Khoa-Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh, thực hiện năm 2021 [11], kết quả nghiên cứu này cho thấy cường độ chịu nén và độ cứng của đất yếu đánh giá tại hiện trường tăng rất đáng kể, với giá trị tăng lần lượt là 151 và 146 lần, các chỉ tiêu cơ lý đạt được của đất yếu sau khi gia cố sử dụng geopolymer có thể đáp ứng tốt yêu cầu làm nền đắp và gia cố nền. Chất kết dính geopolymer cũng đã được nghiên cứu để chế tạo gạch không nung từ vật liệu đất đỏ bazan, và đá bazan bán phong hóa nghiền mịn với kích thước hạt < 0,08 mm bởi nhóm tác giả Kiều Quý Nam và Nguyễn Ánh Dương [12], kết quả nghiên cứu cho thấy cường độ của gạch không nung đạt được lần lượt là 95 kG/cm² (nguyên liệu đất đỏ bazan), và 140-170 kG/cm² (nguyên liệu đá bazan

phong hóa nhẹ). Gần đây nhất, đất có hàm lượng bụi và sét cao (37,86% hạt bụi và 36,69% hạt sét) gia cố bằng geopolymer cũng đã được nhóm tác giả Ngô Thanh Phong và cộng sự nghiên cứu đánh giá năm 2022 [13], trong đó tro bay loại F và dung dịch kiềm hoạt hóa gồm NaOH nồng độ 10 M và Na_2SiO_3 được sử dụng để tổng hợp geopolymer (tỷ lệ phối trộn dung dịch kiềm/tro bay = 0,4), thực hiện thí nghiệm đánh giá cường độ chịu nén đơn trục nở hông sau 12 chu kỳ bảo dưỡng khô/ướt (wetting/drying) của tất cả các mẫu đất đều thu được kết quả trên 4,5 MPa, giá trị này lớn hơn so với giá trị yêu cầu tối thiểu 2,8 MPa của tiêu chuẩn tham chiếu (tiêu chuẩn Anh, BS: 5628-1978) áp dụng cho vật liệu sử dụng làm tường xây [14].

Nhìn chung, các công trình cũng như các công bố mang tính chất tổng quan, hệ thống hóa các cơ sở khoa học trong việc sử dụng geopolymer cải tạo, gia cố đất tàn tích laterit còn khá hạn chế. Mặc dù đất laterit là một loại đất có tương đối nhiều các tính chất, chỉ tiêu cơ lý phù hợp để sử dụng làm vật liệu cho công trình đắp, tuy nhiên, do hàm lượng hạt bụi, hạt sét khá đáng kể nên đây là loại đất có tính trương nở và co ngót tương đối cao nên bất lợi cho ổn định nền móng công trình [15]–[18]. Bên cạnh đó, theo kết quả nghiên cứu của Viện Thổ nhưỡng Nông hóa năm 2002 cho thấy, đất laterit phân bố rộng khắp, dọc theo lãnh thổ từ Bắc đến Nam như thể hiện tại hình 1 [19]. Do đó, việc nghiên cứu cải tạo được tính chất cơ lý của đất laterit đóng vai trò quan trọng trong việc giải quyết bài toán vật liệu sử dụng cho một số hoạt động xây dựng có yêu cầu cao về tính chất cơ lý cũng như khối lượng sử dụng lớn, ví dụ như công trình đắp.

Cho đến nay, để cải thiện một số tính chất cơ lý của đất laterit, ngoài một số giải pháp truyền thống (sử dụng chất kết dính vô cơ: vôi, xi măng...) thì chất kết dính geopolymer đã và đang nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trong và ngoài nước, cụ thể, các kết quả nghiên cứu sử dụng geopolymer gia cố đất laterit gần đây cho thấy sự cải thiện cường độ chịu nén đơn trục nở hông, đặc tính đầm nén của đất đắp là khá đáng kể [13], [20]. Mặc dù vậy, các nghiên cứu trong nước có tính chuyên sâu, hệ thống hóa cơ sở khoa học để làm sáng tỏ những đặc điểm chính của việc sử dụng chất kết dính geopolymer trong cải tạo, gia cố đất laterit chưa nhiều.



Hình 1. Bản đồ phân bố đất tàn tích (laterit) tại Việt Nam (kế thừa của [19])

Do đó, bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu chuyên sâu và tổng quan về chất kết dính geopolymer để làm sáng tỏ hơn về cơ chế cải tạo tính chất cơ lý của đất tàn tích (đất laterit) và tổng hợp phân tích một số yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu quả cải thiện tính chất của hỗn hợp đất gia cố, qua đó bổ sung thêm vào cơ sở khoa học phục vụ hoạt động nghiên cứu ứng dụng cải tạo và gia cố đất laterit phục vụ xây dựng công trình.

2. Phương pháp nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu nghiên cứu chung của bài báo, một số phương pháp nghiên cứu chính được sử dụng trong bài báo, bao gồm: phương pháp thu thập tài liệu/dữ liệu, phương pháp mô tả và xử lý số liệu, phương pháp tiếp thu kế thừa, phương pháp so sánh, cụ thể như sau:

Phương pháp thu thập tài liệu/dữ liệu, mô tả và xử lý số liệu: trên cơ sở nội dung của các công trình khoa học đã công bố trong và ngoài nước (đặc biệt từ công trình công bố trong các tạp chí khoa học uy tín và các công trình đề tài khoa học các cấp đã hoàn thành) về việc tổng hợp chất kết dính geopolymer cũng như sử dụng chất kết dính geopolymer trong lĩnh vực cải tạo tính chất cơ lý của vật liệu đất laterit nói riêng và vật liệu xây dựng khác nói chung, bài báo tiến hành tổng hợp, mô tả và phân tích số liệu, qua đó định hướng cho mục tiêu nghiên cứu về quá trình polymer hóa, nguyên lý cải tạo tính chất của đất sử dụng geopolymer.

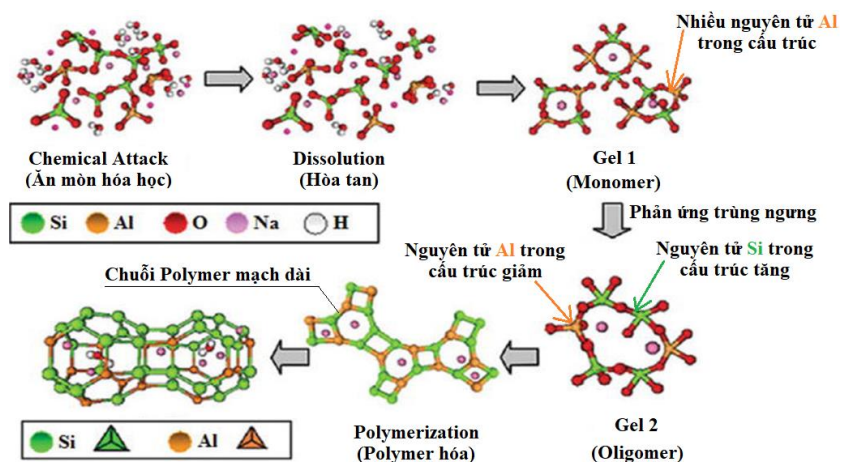
Phương pháp tiếp thu kế thừa và so sánh: thực hiện tổng hợp, kế thừa các số liệu nghiên cứu thực nghiệm sử dụng chất kết dính geopolymer trong cải tạo, gia cố đất laterit từ những công trình khoa học công bố trên tạp chí uy tín trong và ngoài nước, bài báo tiến hành phân tích, so sánh để tìm ra quy luật chung tổng thể để có một kết luận hoàn chỉnh về sự ảnh hưởng của một số yếu tố chính đến quá trình polymer hóa và tính chất cơ học của đất laterit cải tạo bằng chất kết dính geopolymer.

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

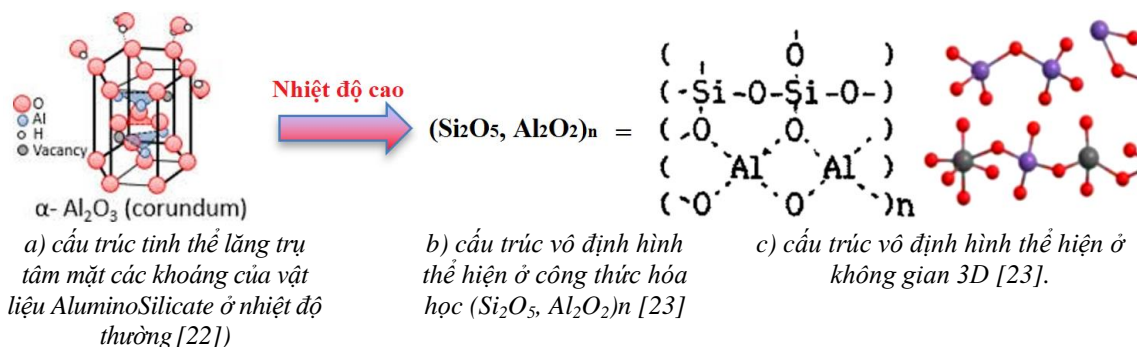
3.1. Cơ chế cải tạo đất sử dụng chất kết dính geopolymer

3.1.1. Cơ chế tổng hợp geopolymer

Chất kết dính geopolymer (gọi tắt là geopolymer) được nghiên cứu bởi nhóm các nhà khoa học người Pháp và được giới thiệu lần đầu vào những năm 1970 [5]. Theo đó, geopolymer được tổng hợp từ phản ứng kiềm hóa giữa các vật liệu giàu khoáng AluminoSilicate (hàm lượng Alumin (Al) và Silic (Si) cao, hàm lượng CaO thấp) có độ hoạt tính và dung dịch kiềm chứa gốc hydroxyl tự do (-OH) có khả năng tham gia phản ứng cao, như dung dịch NaOH, KOH...



Hình 2. Quá trình tổng hợp geopolymer (kế thừa từ [21])

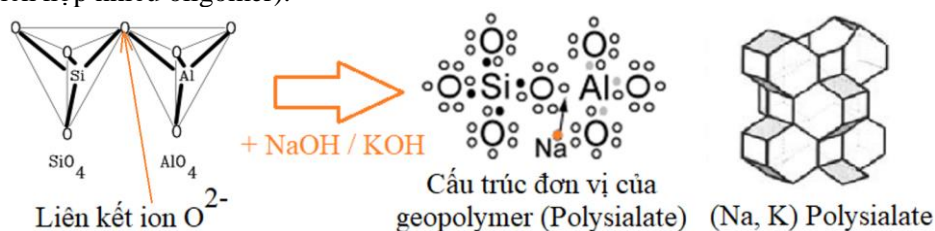


Hình 3. Ví dụ minh họa về sự thay đổi cấu trúc tinh thể khoáng của vật liệu AluminoSilicate

Sau giai đoạn các khoáng AluminoSilicate bị kiềm hóa thì các đơn phân tử (Monomer) được hình thành và tiếp tục phản ứng với nhau để tạo thành phân tử có kích thước lớn hơn được gọi là Oligomer (tiền chất geopolymer), trong môi trường kiềm các tiền chất geopolymer kết hợp (phản ứng) tạo thành bộ khung Poly-sialate hay còn gọi là bộ xương geopolymer, các bộ xương này thực hiện phản ứng trùng ngưng hay Polymer hóa để tạo thành geopolymer có cấu trúc vững chắc [5].

Chi tiết các quá trình tổng hợp geopolymer được thể hiện tại hình 2. Do quá trình tổng hợp các vật liệu khoáng trong môi trường kiềm cơ bản tương tự như các polymer hữu cơ, nên Davidovits và cộng sự (1978) đã sử dụng thuật ngữ “geopolymer” để đặt tên cho loại vật liệu mới được tổng hợp từ vật liệu AluminoSilicate hoạt tính và dung dịch kiềm [21].

Tiếp cận ở góc độ với tên gọi khác là vật liệu kiềm hóa hàm lượng canxi thấp (Alkali-Activated Materials, AAM) Provis J.L và cộng sự cho rằng quá trình geopolymer hóa được bắt đầu bằng quá trình hòa tan vật liệu giàu khoáng Si và Al bởi dung dịch kiềm, kết quả của quá trình hòa tan là sự hình thành các đơn phân tử Gel 1 còn nhiều nguyên tử Al trong cấu trúc, trong môi trường kiềm các Gel 1 phản ứng trùng ngưng để tạo thành Gel 2 có số lượng nguyên tử Si tăng lên. Tuy nhiên, về bản chất các Gel 2 chính là oligomer được tổng hợp từ Gel 1 (monomer) và được polymer hóa tạo ra các chuỗi polymer mạch dài, các chuỗi polymer này tiếp tục phát triển để tạo thành bộ khung geopolymer; và trong một số công trình nghiên cứu gần đây, geopolymer đã và đang được phân loại như là một tập con của AAM [6], [7]. Các kết quả nghiên cứu gần đây cho thấy một số phụ phẩm công nghiệp, như tro bay, thủy tinh công nghiệp, bột nghiền từ sản phẩm gốm sứ công nghiệp... là những nguồn vật liệu AluminoSilicate có hàm lượng Al_2O_3 và SiO_2 cao, cung cấp các khoáng quan trọng cho quá trình tổng hợp geopolymer như Al, và Si [24]–[28]. Bên cạnh đó, các vật liệu AluminoSilicate này đều đã trải qua quá trình gia nhiệt ở nhiệt độ cao nên cấu trúc kết tinh (trung hòa về điện tích, khó bị hòa tan/hoạt hóa bởi dung dịch kiềm) ở nhiệt độ thường sẽ chuyển thành cấu trúc vô định hình hoặc bán kết tinh dưới dạng cấu trúc tứ diện như thể hiện bằng công thức hóa học và không gian 3D tại hình 3 [23]. Dưới dạng cấu trúc vô định hình hoặc bán kết tinh thì các khoáng Silica và Alumina trở nên hoạt tính và bị hòa tan trong môi trường kiềm để hình thành các đơn phân tử monomer (SiO_4 , AlO_4). Hình 4 thể hiện sự hình thành cấu trúc đơn vị geopolymer (polysialate), cụ thể như sau [5]: hai đơn phân tử monomer là SiO_4 và AlO_4 (ở thể tứ diện hoạt tính) liên kết với nhau bằng nguyên tử oxy (O^{2-}) dùng chung, còn được gọi là cầu oxy để tạo ra các cấu trúc đơn vị của Geopolymer được đặt tên là polysialate. Sự kết hợp của hai monomer tạo thành phân tử có kích thước lớn hơn là oligomer, tuy nhiên oligomer có tổng điện tích là âm nên cần có cation dương, Na^+ , từ trong môi trường kiềm (NaOH) để trung hòa về điện cho cấu trúc oligomer. Trong môi trường kiềm, các oligomer tiếp tục phản ứng trùng ngưng (hay ngưng tụ lại) để tạo thành các polymer (cao phân tử tích hợp nhiều oligomer).



Hình 4. Sự hình thành cấu trúc đơn vị geopolymer (Polysialate) (kế thừa và tổng hợp từ [23], [29])

Hình 5 thể hiện hình ảnh trực quan về một số loại vật liệu: kim loại kiềm Na, bột thủy tinh nghiền, tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn được sử dụng trong quá trình tổng hợp hỗn hợp geopolymer để cải tạo và gia cố vật liệu xây dựng tại Việt Nam [8], [11], [13]. Ngoài ra, một số vật liệu khác cũng đã và đang được sử dụng trong quá trình tổng hợp hỗn hợp geopolymer, như bột thủy tinh nghiền, bột gốm nghiền [26], [28], [30].



(a) Một số vật liệu AluminoSilicate: tro bay (FA), xi lò cao nghiền mịn (GGBS), bột thủy tinh nghiền (GW)

(b) Kim loại kiềm Na sử dụng để tổng hợp dung dịch kiềm hoạt hóa

Hình 5. Một số vật liệu AluminoSilicate (a) và (b) kim loại kiềm sử dụng tổng hợp geopolymer

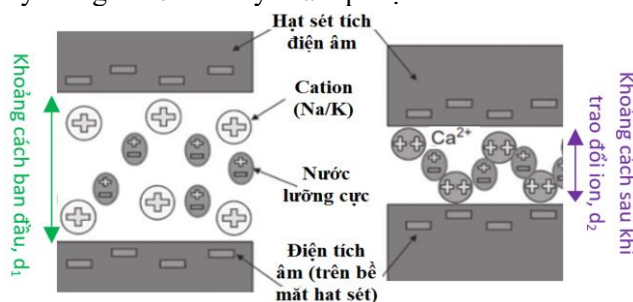
3.1.2. Cơ chế cải tạo tính chất của đất sử dụng chất kết dính geopolymer

Các kết quả nghiên cứu gần đây cho thấy việc cải tạo vật liệu đất sử dụng chất dính kết hóa học thân thiện với môi trường (thuật ngữ “geopolymer” ngày nay) đã có từ khá xa xưa, đặc biệt trong quá trình sản xuất gạch đất sét để xây dựng các di tích cổ [31], [32]; trong đó, bản chất của cơ chế cải tạo (thay đổi) tính chất của vật liệu đất nằm ở sự có mặt của dung dịch kiềm và các khoáng AluminoSilicate. Cụ thể, khi đất được trộn với geopolymer thì dung dịch kiềm trong hỗn hợp geopolymer sẽ thúc đẩy tốc độ các phản ứng polymer để tạo các gels, như N-A-S-H, C-(A)-S-H, K-A-S-H, M-A-S-H và phản ứng pozzolanic thông qua việc làm tăng giá trị (độ) pH tự nhiên của đất; qua đó hình thành các phản ứng hóa lý tạo sự liên kết giữa các hạt đất [32], [33]. Quá trình hóa lý chính xảy ra trong hỗn hợp đất và geopolymer có thể kể đến bao gồm: 1/quá trình trao đổi cation (các i-on mang điện tích dương); 2/keo tụ và kết đông; 3/hydrat hóa/thủy hóa; 4/quá trình (phản ứng) pozzolan; 5/quá trình tạo keo (gelation) và xi măng hóa (cementation) [34]:

3.1.2.1. Trao đổi cation (i-on dương)

Sự hình thành liên kết trong hỗn hợp đất gia cố bắt đầu từ quá trình trao đổi các i-on mang điện tích dương, cụ thể là ion Ca^{2+} trong hỗn hợp geopolymer sẽ được trao đổi với các i-on kim loại khác có trong đất như Na^+ , Al^{3+} như thể hiện tại hình 6 [34], [35]. Kết quả của quá trình trao đổi i-on sẽ làm thay đổi tính chất vật lý của đất, cụ thể có thể kể đến như bề dày lớp nước hấp thụ hay lớp điện đôi giảm, lực tương tác tĩnh điện Van der Waals chuyển thành lực hút làm cho các hạt sét lại gần nhau hơn, hay nói cách khác sự chuyển đổi này làm giảm chiều dày của lớp điện đôi.

Bên cạnh đó, do sự trao đổi cation nên cấu trúc, trạng thái, và cường độ của đất bị thay đổi, và mức độ hấp thụ cation phụ thuộc vào hóa trị và khối lượng nguyên tử của mỗi nguyên tố; theo đó, các ion dương (cation) có hóa trị và nguyên tử khối càng cao thì khả năng hấp thụ/trao đổi cation càng tăng, một số cation phổ biến tham gia tích cực vào quá trình trao đổi có thể kể đến bao gồm: Al^{3+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ [35]



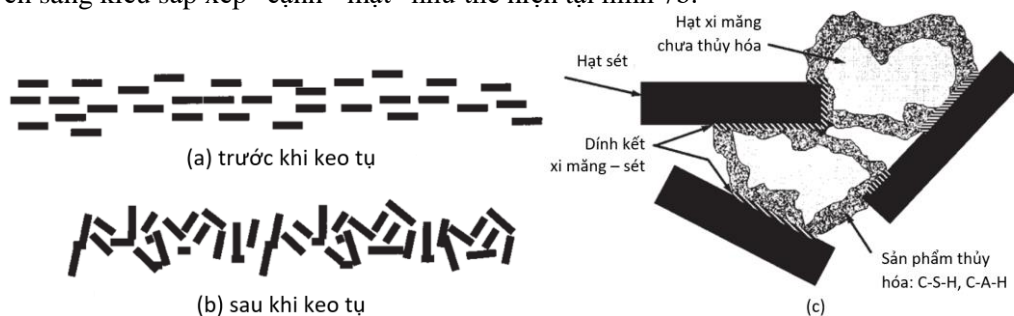
Hình 6. Trao đổi điện tích trong đất [36]

Ghi chú: sau khi trao đổi ion, khoảng cách $d_1 < d_2$

3.1.2.2. Keo tụ và kết đông

Ở trạng thái tự nhiên, các hạt sét tích điện âm bị phân tán và có cấu trúc sắp xếp song song như thể hiện tại hình 7a và có xu hướng đẩy nhau do mang cùng điện tích âm. Tuy nhiên, khi các hạt sét với lớp vỏ cation cách nhau một khoảng cách nhất định nào đó thì lực Van der Waals chuyển từ lực đẩy sang lực hút, chính hiện tượng này làm cho các hạt đất có xu hướng xích lại

gần nhau hơn. Kết quả của tương tác này sẽ hình thành sự keo tụ và kết thành đông, các hạt sét chuyển sang kiểu sắp xếp “cạnh - mặt” như thể hiện tại hình 7b.



Hình 7. Hiện tượng keo tụ hạt (sét) đất [37]

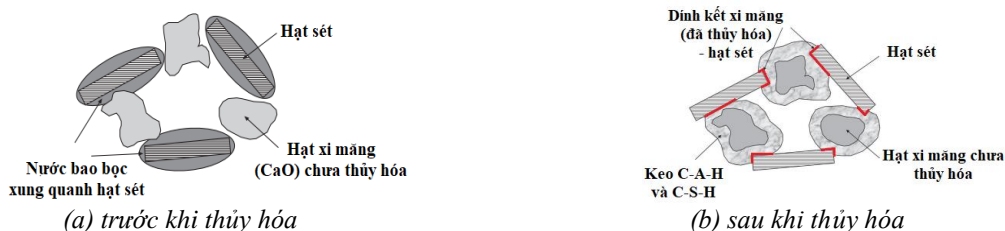
Sự kết tụ của hạt đất được hình thành bởi sự xuất hiện của các sản phẩm phản ứng, như các gel C-S-H và C-A-H, do các phản ứng thủy hóa (hình 7c), và phản ứng pozzolan tạo ra. Các gel sau khi được tạo ra sẽ liên kết và bao bọc hoàn toàn các “đông” để tạo thành một khối hỗn hợp đất có tính chất cơ lý thay đổi. Bên cạnh đó, quá trình keo tụ thường tỏa nhiệt do có phản ứng giữa các khoáng AluminoSilicate có mặt trong đất và trong hỗn hợp geopolymer khi ở trong môi trường kiềm. Chính sự phát sinh nhiệt này sẽ tiếp tục thúc đẩy quá trình geopolymer hóa, đặc biệt ở giai đoạn cuối của quá trình cải tạo/gia cố vật liệu đất sử dụng geopolymer [38].

3.1.2.3. Phản ứng thủy hóa

Phản ứng thủy hóa xảy ra ngay sau khi tiến hành trộn đất với hỗn hợp dung dịch geopolymer, cụ thể, các khoáng CaO sẽ thủy hóa như thể hiện tại phương trình (1) để tạo ra Ca(OH)_2 hay được biết đến là các sản phẩm có tính thủy lực đầu tiên, quá trình này có khả năng làm hàm lượng nước lỗ rỗng trong đất giảm.



Sản phẩm của phương trình (1) sẽ tiếp tục hòa tan vào trong nước lỗ rỗng và làm tăng độ điện phân cũng như độ pH của nước trong đất (phương trình (2)); đây chính là những điều kiện thuận lợi để hòa tan các khoáng SiO_2 và Al_2O_3 và tạo ra các Gel, như C-S-H, C-A-H, C-H... liên kết các hạt đất và hạt xi măng (CaO) trong suốt quá trình đông rắn [36]. Hình 8 thể hiện cấu trúc của hỗn hợp đất và chất kết dính trước và sau khi thủy hóa.

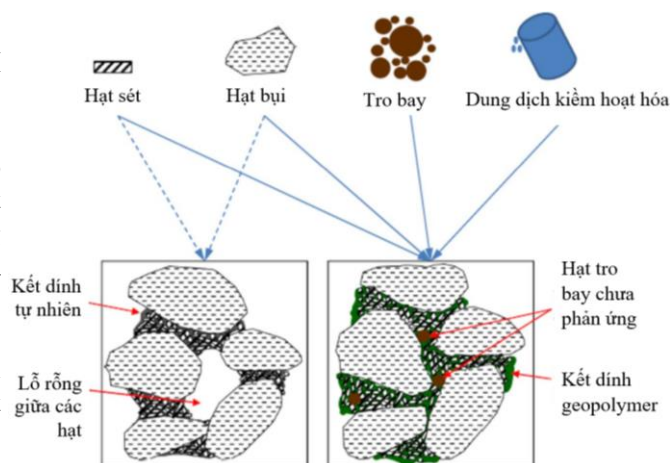


Hình 8. Cấu trúc của hỗn hợp đất + chất kết dính trước (a), và (b) sau khi thủy hóa [36]

3.1.2.4. Phản ứng pozzolan

Đặc điểm chính của phản ứng pozzolan là các khoáng Ca(OH)_2 di chuyển thông qua môi trường nước trong đất để kết hợp với các khoáng Aluminat và/hoặc Silicat để tạo ra hợp chất có đặc tính thủy lực như thể hiện tại các phương trình (3), (4). Phản ứng pozzolan lấy đi một phần nước trong đất, do đó, ở góc độ cải thiện tính chất xây dựng của đất thì đây là một điểm có lợi.

Một số nghiên cứu cho thấy các phản ứng pozzolan chỉ xảy ra khi độ pH $\geq 10,5$ và khi các khoáng SiO_2 , Al_2O_3 bị hòa tan [39]. Hình 9 trình bày một mô hình thể hiện cơ chế/nguyên lý cải tạo đất hoang thổ (loess soil) sử dụng chất kết dính geopolymer được Liu và cộng sự công bố năm 2016. Theo kết quả nghiên cứu cho thấy lỗ rỗng giữa các hạt đất được điền đầy kín khít sau khi sử dụng chất kết dính geopolymer, bên cạnh chất kết dính tự nhiên thì các hạt đất (hạt bụi, hạt sét) được gắn kết với nhau nhờ chất kết dính được tạo ra từ quá trình polymer hóa.



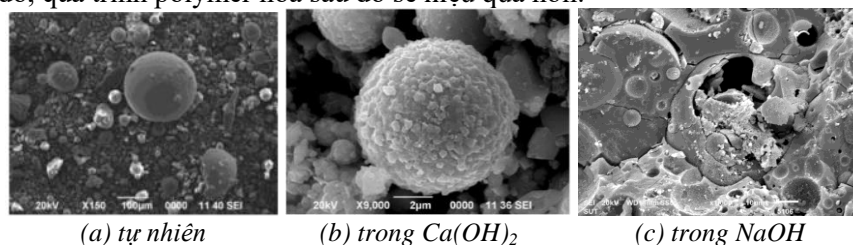
Hình 9. Một nguyên lý cải tạo tính chất của đất sử dụng geopolymer [40]

Như vậy, có thể thấy cơ chế cải tạo tính chất của đất sử dụng geopolymer về bản chất cũng cần có những điều kiện khá tương đồng như khi sử dụng xi măng Portland truyền thống, cụ thể là phải tạo được các keo (gel) dính kết, trong đó, điều kiện để hình thành liên kết khi sử dụng cả hai loại vật liệu: geopolymer và xi măng là đều cần có nguồn cung cấp các khoáng Si-Al và nồng độ kiềm đủ cao (pH > 10,5) [39]. Đối với việc sử dụng xi măng Portland truyền thống thì môi trường kiềm được tạo ra chủ yếu bởi quá trình thủy hóa của khoáng CaO (hạt xi măng); còn khi sử dụng geopolymer thì nồng độ kiềm có thể đạt mức cao hơn do trong geopolymer luôn có hỗn hợp dung dịch kiềm (NaOH, KOH) có gốc OH tự do có khả năng tham gia phản ứng rất cao, chính nhờ vào khả năng chủ động tạo ra môi trường kiềm có nồng độ phù hợp sẽ giúp quá trình hoạt hóa nhanh hơn, cường độ mạnh hơn, và do đó, các liên kết hình thành sẽ tốt hơn.

3.2. Một số yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu quả cải thiện tính chất của hỗn hợp đất gia cố

3.2.1. Loại cation kiềm

Từ các kết quả phân tích quá trình geopolymer tại mục 2 cho thấy, kim loại kiềm đóng vai trò quan trọng và có ảnh hưởng đến hầu hết các giai đoạn của quá trình geopolymer: từ giai đoạn hòa tan đến quá trình cứng hóa các keo (gel), sự kết tinh của các tinh thể, và ảnh hưởng trực tiếp đến số lượng và kích thước của các cấu trúc đơn vị của geopolymer (ví dụ như oligomer). Đối với dung dịch kiềm kích hoạt từ NaOH thì sự hòa tan diễn ra nhanh hơn và mãnh liệt hơn, các oligomer được hình thành có kích thước lớn nhưng không nhiều; ngược lại dung dịch kích hoạt dựa trên KOH thì sự hòa tan chậm hơn, oligomer có kích thước nhỏ hơn nhưng số lượng lại nhiều hơn; và do đó, quá trình polymer hóa sau đó sẽ hiệu quả hơn.



Hình 10. Cấu trúc của hạt tro bay trong các môi trường khác nhau: a, b [27], (c) [41]

Hình 10 thể hiện ảnh hưởng của loại dung dịch kiềm đến cấu trúc của hạt tro bay của một số công trình nghiên cứu, cụ thể, tro bay ở trạng thái tự nhiên (chưa xử lý bề mặt) có mức độ hoạt tính thấp, lớp bề mặt gồm các chuỗi thủy tinh Silica-Alumina (có thành phần Si, Al) của hạt tro bay rắn chắc và bền hóa chất, mức độ hoạt tính hóa học thấp. Khi được xử lý bằng các dung dịch

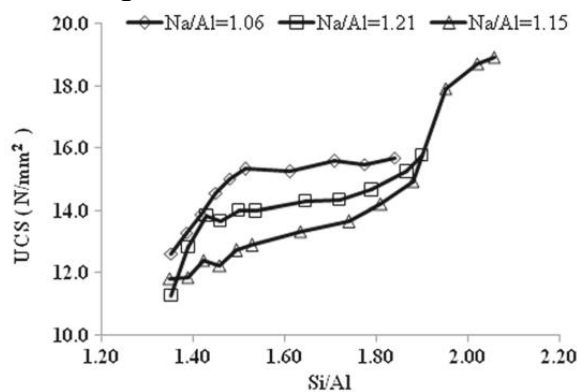
kiềm khác nhau như $\text{Ca}(\text{OH})_2$, và NaOH thì cấu trúc bề mặt tro bay thay đổi; trong đó, dung dịch NaOH ăn mòn, phá vỡ lớp vỏ bọc ngoài của các hạt tro bay mạnh mẽ hơn, hầu như tất cả các hạt hình cầu bị biến dạng, xù xì hơn, chính điều này làm diện tích bề mặt tro bay tăng lên (một số nghiên cứu cho thấy diện tích bề mặt có thể tăng lên gấp khoảng 30 lần, thể tích lỗ xốp tăng lên gần 40 lần) và do đó tăng khả năng tiếp xúc để liên kết các pha trong quá trình polymer hóa.

Đối với dung dịch kiềm $\text{Ca}(\text{OH})_2$, do nồng độ nhóm $-\text{OH}$ thấp hơn so với NaOH nên mức độ ăn mòn, phá vỡ bề mặt của hạt tro bay thấp hơn, mặc dù bề mặt tro bay trở nên thô ráp hơn so với trạng thái tự nhiên nhưng hầu như mới chỉ làm lộ được các hạt vi cầu mà chưa phá vỡ được hạt tro bay [27].

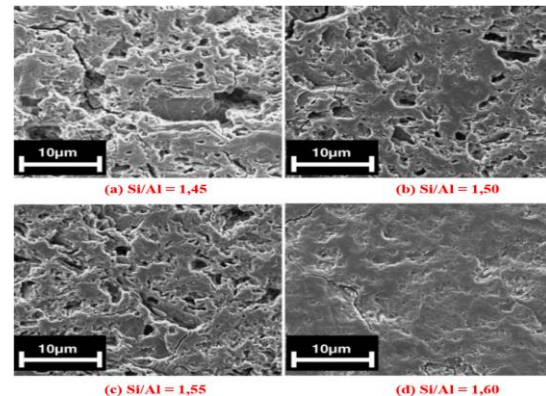
3.2.2. Tỷ số Si/Al

Tỷ số Si/Al là một trong những tham số đóng vai trò quan trọng của quá trình geopolymer hóa, các kết quả nghiên cứu thực nghiệm đều cho thấy, khi tỷ số Si/Al tăng thì cường độ chịu nén đơn trục nở hông (UCS) của mẫu đất gia cố bằng chất kết dính geopolymer tăng [42]–[44]. Cụ thể như thể hiện tại hình 11, trong đó chất kết dính geopolymer được sử dụng để gia cố mẫu đất có giới hạn chảy $\text{LL} = 37,68\%$, giới hạn dẻo $\text{PL} = 23,61\%$ thuộc nhóm đất sét có tính dẻo thấp (nhóm CL theo hệ thống phân loại đất thống nhất USCS) của Singhi và đồng nghiệp năm 2016 [29].

Kết quả thí nghiệm với cùng tỷ số Na/Al thì UCS của mẫu đất tăng từ 12,0 MPa lên khoảng 16,0 MPa khi tỷ số Si/Al tăng từ 1,35 lên 1,88. Cơ chế của việc tăng cường độ vật liệu geopolymer khi tỷ số Si/Al tăng được Duxson và cộng sự trình bày tại [34], theo đó, khi tỷ số Si/Al nhỏ ($\leq 1,4$) trong mẫu vật liệu xuất hiện nhiều các lỗ rỗng liên thông như thể hiện tại hình 12, và hàm lượng vật liệu không được phản ứng hết (biểu thị bởi sự tồn tại của các chất kết tủa) khá đáng kể, do đó, UCS của vật liệu đạt giá trị thấp hơn. Khi tỷ số Si/Al tăng trong khoảng (1,4÷2,0) thì độ rỗng giảm, hỗn hợp vật liệu tạo thành đồng nhất và đặc chắc hơn, nên UCS của vật liệu có giá trị cao hơn.

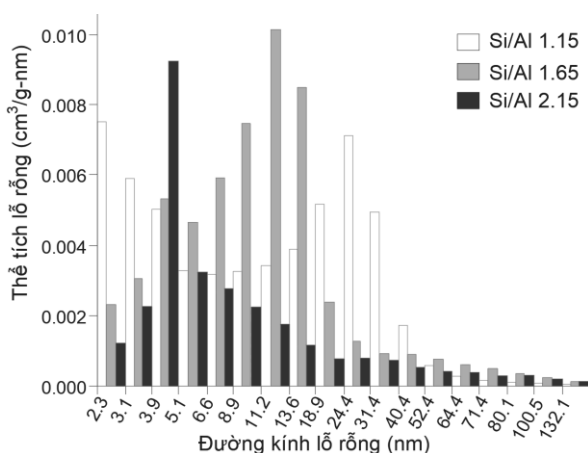


Hình 11. Ảnh hưởng của tỷ lệ Si/Al đến cường độ chịu nén (UCS) của mẫu đất [44]

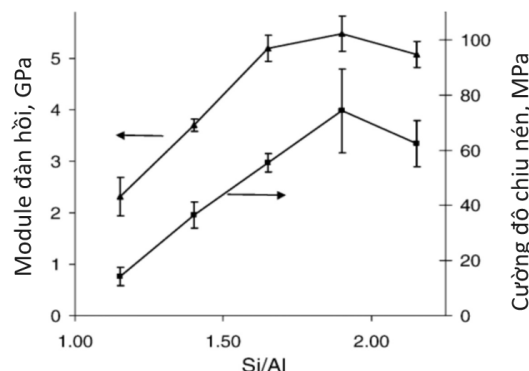


Hình 12. Ảnh hưởng của Si/Al đến cấu trúc của vật liệu sử dụng chất kết dính geopolymer [45]

Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả Thokchom năm 2012 cho thấy UCS của mẫu geopolymer vẫn có khả năng tiếp tục tăng khi tỷ số Si/Al $> 2,0$ như thể hiện tại bảng 1 [43]. Sử dụng chất lỏng thủy ngân đánh giá lỗ rỗng khi thay đổi tỷ số Si/Al trong geopolymer, Duxson và cộng sự cho thấy khi tỷ số Si/Al tăng thì sự phân bố thể tích lỗ rỗng và đường kính lỗ rỗng giảm như thể hiện tại hình 13 [46]. Tuy nhiên, khi tỷ số Si/Al lớn hơn 2,0 có thể ảnh hưởng đến liên kết Si-O-Al và làm giảm độ cứng của trong vật liệu sử dụng geopolymer như thể hiện tại hình 14. Do đó, để đánh giá đầy đủ hơn về ảnh hưởng của Si/Al và qua đó xác định được tỷ số tối ưu của Si/Al khi tổng hợp chất kết dính geopolymer gia cố đất thì vẫn cần phải tiếp tục có các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 13. Ảnh hưởng của tỷ số Si/Al đến đường kính và thể tích lỗ rỗng (kế thừa của [46])



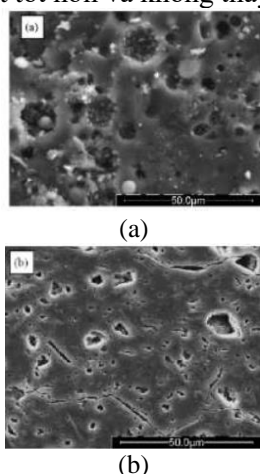
Hình 14. Ảnh hưởng của tỷ số Si/Al đến cường độ chịu nén và module đàn hồi (kế thừa của [46])

Bảng 1. Ảnh hưởng của tỷ lệ Si/Al đến UCS [43]

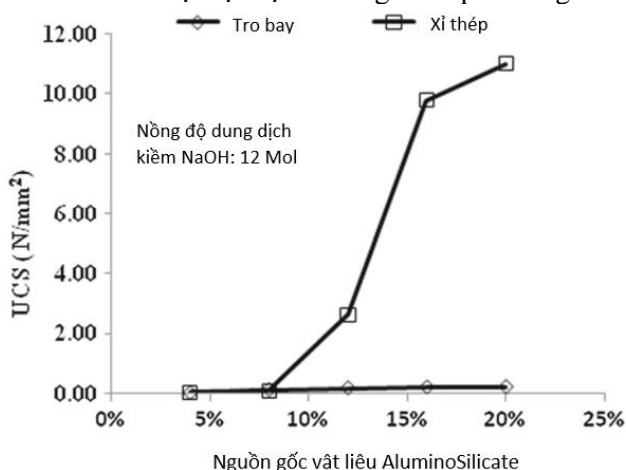
Tỷ lệ Si/Al	Hàm lượng Na ₂ O (%)	Tỷ lệ Nước/Tro bay	Cường độ chịu nén (MPa)	Điều kiện bảo dưỡng
1,7	8,5	0,32	27,73	85 ⁰ C
1,9	8,5	0,32	36,51	85 ⁰ C
2,2	8,5	0,32	39,47	85 ⁰ C

3.2.3. Nguồn gốc vật liệu AluminoSilicate

Như đã tổng hợp và phân tích tại mục 3.1, vật liệu thành phần AluminoSilicate đóng vai trò quan trọng, như một phụ gia cung cấp các khoáng Si, Al cho quá trình geopolymer hóa, và do đó, tính chất và nguồn gốc của vật liệu AluminoSilicate sẽ có ảnh hưởng đến quá trình geopolymer hóa cũng như tính chất của đất gia cố. Sự ảnh hưởng của nguồn gốc vật liệu AluminoSilicate được nghiên cứu trong công trình của [47], cụ thể, kết quả phân tích SEM của geopolymer tổng hợp từ hai nguồn vật liệu AluminoSilicate, một từ tro bay, và một từ nguồn gốc metakaoline thể hiện tại hình 15. Theo đó, geopolymer từ tro bay (hình 15a) còn nhiều vật liệu khoáng chưa phản ứng hết, bề mặt không được đồng nhất. Trong khi đó, geopolymer từ metakaolin (hình 15b) có độ đồng nhất tốt hơn và không thấy nhiều dấu vết của các loại vật liệu khoáng chưa phản ứng hết.



Hình 15. Geopolymer từ: (a) tro bay; (b) metakaolin (kế thừa của [47])

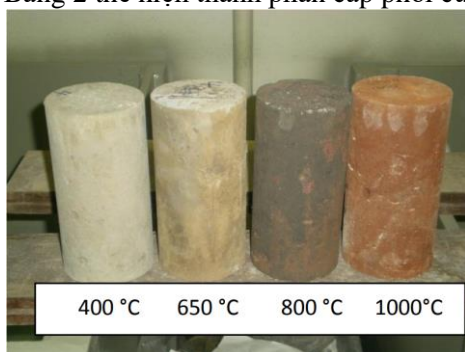


Hình 16. Ảnh hưởng của nguồn gốc vật liệu đến UCS (kế thừa của [44])

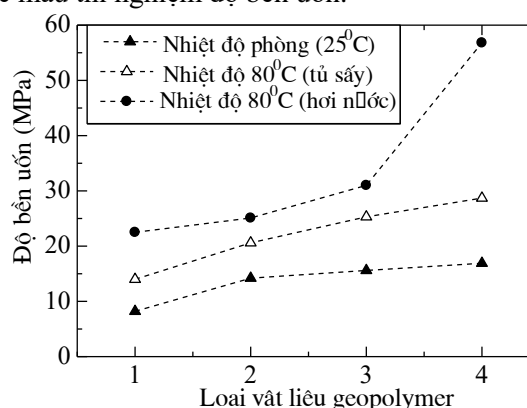
Hình 16 thể hiện sự ảnh hưởng của nguồn gốc vật liệu AluminoSilicate đến UCS của mẫu đất gia cố trong nghiên cứu của Singhi và cộng sự năm 2016, kết quả cho thấy giá trị UCS của mẫu đất sử dụng xi thép cao hơn so với việc sử dụng tro bay. Cụ thể, ở cùng hàm lượng sử dụng 20% thì UCS của mẫu đất đạt được khi sử dụng xi thép và tro bay lần lượt là 11,0 MPa và 0,2 MPa [44].

3.2.4. Công tác bảo dưỡng

Nhiệt độ, độ ẩm và thời gian bảo dưỡng là các tham số chính trong việc bảo dưỡng vật liệu sử dụng chất kết dính geopolymer. Kết quả của một nghiên cứu cho thấy, nhiệt độ có thể làm tăng gia tốc các phản ứng geopolymer hóa, tuy nhiên, khi bảo dưỡng ở nhiệt độ cao thì thường kèm theo sự mất nước trong hỗn hợp vật liệu, giảm độ bền, thay đổi màu sắc hoặc thậm chí có thể gây những vết nứt nhỏ khi vật liệu geopolymer chịu tác dụng của nhiệt độ trên 800°C như thể hiện tại hình 17 [48]. Xem xét ảnh hưởng của điều kiện bảo dưỡng đến độ bền uốn của vật liệu geopolymer của Fekoua và cộng sự năm 2021 thể hiện tại hình 18 cho thấy độ bền uốn của vật liệu sử dụng chất kết dính geopolymer bảo dưỡng ở nhiệt độ cao hơn đạt giá trị lớn hơn [49]. Cụ thể với cùng loại vật liệu sử dụng chất kết dính geopolymer (loại 4) thì độ bền uốn ở điều kiện nhiệt độ phòng (25°C), nhiệt độ 80°C (không có và có hơi nước) lần lượt là 16,9 MPa, 28,7 MPa, và 56,8 MPa. Bên cạnh đó, kết quả thực nghiệm của Fekoua cũng phản ánh sự cần thiết của việc duy trì độ ẩm tương đối trong quá trình vật liệu geopolymer phát triển cường độ chịu uốn. Cụ thể, khi được bảo dưỡng với cùng một giá trị nhiệt độ 80°C nhưng mẫu vật liệu bảo dưỡng theo phương pháp hơi nước cho giá trị độ bền uốn cao hơn so với phương pháp bảo dưỡng trong tủ sấy. Bảng 2 thể hiện thành phần cấp phối của các mẫu thí nghiệm độ bền uốn.



Hình 17. Ảnh hưởng của nhiệt độ bảo dưỡng đến màu sắc và sự hình thành vết nứt vật liệu sử dụng geopolymer (kế thừa của [48])



Hình 18. Ảnh hưởng của điều kiện bảo dưỡng đến độ bền uốn của vật liệu geopolymer (kế thừa của [49])

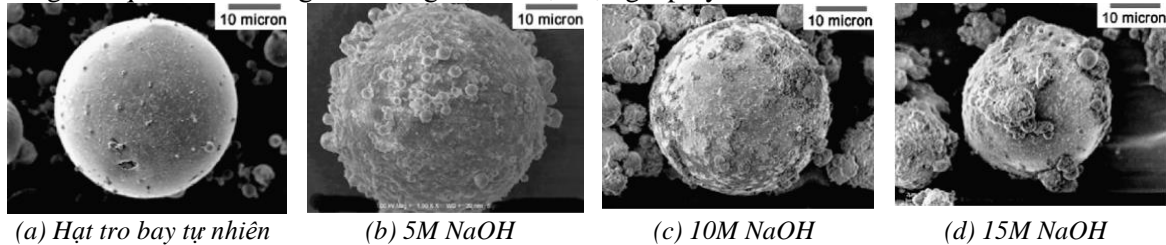
Bảng 2. Thành phần cấp phối của vật liệu geopolymer [49]

Loại vật liệu geopolymer	Khối lượng, g				
	Laterit	Tro trấu	Cát nhân tạo (đá nghiền mịn, 63 μm - 350 μm)	Cốt liệu thô (đá nghiền 350 μm -5,0 mm)	Dung dịch kiềm ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$ nồng độ NaOH: 8 M)
1	50	0	50	100	35
2	35	15	50	100	35
3	30	20	50	100	35
4	25	25	50	100	35

3.2.5. Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch kiềm

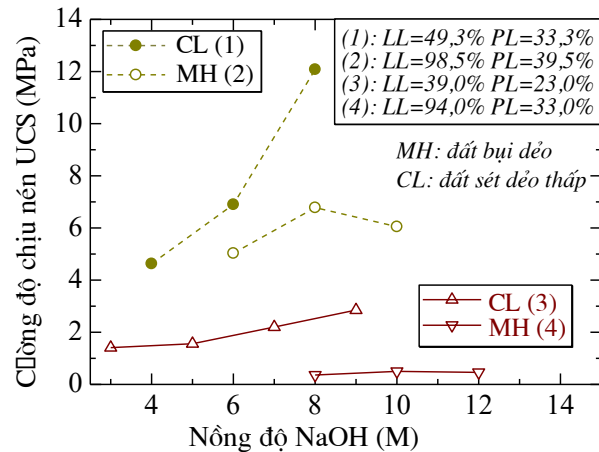
Cho đến nay nồng độ dung dịch kiềm NaOH sử dụng trong quá trình tổng hợp geopolymer gia cố đất có giá trị trong khoảng từ 3,0-18,0 M [50]-[54]. Các kết quả nghiên cứu đều cho thấy sự cải thiện tính chất cơ học của vật liệu khi sử dụng chất kết dính geopolymer liên quan đến nồng độ dung dịch kiềm. Cụ thể, khi nồng độ dung dịch kiềm cao thì quá trình polymer hóa và tốc độ

hòa tan các khoáng AluminoSilicate vô định hình xảy ra nhanh hơn, mạnh mẽ hơn như thể hiện tại hình 19, các tiền chất geopolymer như oligomer được tạo ra nhiều hơn, kích thước lớn hơn, và do đó tạo được bộ khung xương ba chiều có cấu trúc vững chắc hơn, cường độ đạt được cao hơn [55]. Tuy nhiên, phản ứng kiềm hóa là phản ứng tỏa nhiệt, do đó, việc sử dụng dung dịch kiềm nồng độ cao thì nhiệt tỏa ra càng nhiều và khi nhiệt độ tăng sẽ làm giảm lượng nước và tạo các lỗ rỗng, kết quả có thể làm giảm cường độ của vật liệu geopolymer.



(a) Hạt tro bay tự nhiên (b) 5M NaOH (c) 10M NaOH (d) 15M NaOH
Hình 19. Kết quả phân tích bề mặt hạt tro bay ở các trạng thái khác nhau: (a) tự nhiên, (b) trong dung dịch NaOH 5M, (c) NaOH 10 M, và (d) NaOH 15M [52]

Hình 20 thể hiện sự ảnh hưởng của nồng độ NaOH đến cường độ chịu nén đơn trục nở hông UCS của một số loại đất có hàm lượng bụi và sét cao. Cường độ chịu nén đơn trục nở hông của các mẫu đất đều được cải thiện tăng khi nồng độ NaOH tăng, trong đó, ảnh hưởng của nồng độ NaOH thể hiện rõ nét đối với nhóm đất sét dẻo thấp (nhóm CL), tuy nhiên, đối với nhóm đất sét bụi dẻo (nhóm MH theo phân loại USCS) thì sự cải thiện không đáng kể ngay cả khi với nồng độ NaOH sử dụng lớn hơn (12 M). Do đó, có thể nhận thấy, đối với nhóm đất rất dẻo thì sự cải thiện về cường độ của đất khi sử dụng chất kết dính geopolymer không chỉ phụ thuộc vào nồng độ của NaOH.



Hình 20. Ảnh hưởng của nồng độ NaOH đến UCS [50], [56]

Ghi chú:

- + kết quả thể hiện trên đường nét liền là của [50]
- + kết quả thể hiện trên đường nét đứt là của [56]

4. Kết luận

Bài báo đã thực hiện nghiên cứu tổng quan về quá trình polymer hóa cũng như ảnh hưởng của một số yếu tố chính đến tính chất cơ học của đất laterit gia cố bằng geopolymer, kết quả nghiên cứu cho thấy chất kết dính geopolymer có thể cải thiện đáng kể cường độ chịu nén đơn trục và độ bền uốn của đất laterit, trong đó, sự cải thiện cường độ của đất laterit phụ thuộc đáng kể vào chất lượng của quá trình polymer hóa. Quá trình polymer hóa chịu ảnh hưởng của một số yếu tố chính, bao gồm: loại cation kiềm, nguồn gốc hay độ hoạt tính của vật liệu AluminoSilicate, nồng độ dung dịch kiềm, điều kiện bảo dưỡng, và tỷ lệ Si/Al. Bên cạnh đó, khi trong thành phần của đất có hàm lượng hạt bụi lớn trạng thái dẻo thì sự cải thiện cường độ của đất phụ thuộc không đáng kể vào nồng độ dung dịch kiềm, do đó, đối với loại đất này cần xem xét đến các yếu tố khác, như: hàm lượng vật liệu AluminoSilicate (tro bay, xỉ lò cao...) và tỷ số Alkali (Si/Al) để hiệu quả cải thiện cường độ của đất được cao hơn.

Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm đều cho thấy cường độ mẫu vật liệu geopolymer đạt giá trị tối ưu khi tỷ số Si/Al nằm trong khoảng từ (1,85÷2,0), tuy nhiên, vẫn có một số nghiên cứu cho thấy cường độ vẫn cải thiện tăng khi tỷ số Si/Al $\geq 2,0$, do đó, sự ảnh hưởng của tỷ số Si/Al

cần được tiếp tục nghiên cứu để làm rõ hơn để bổ sung vào cơ sở thiết kế cấp phối tối ưu khi cải tạo và gia cố đất laterit sử dụng geopolymer.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn thành viên Nhóm nghiên cứu Địa kỹ thuật, vật liệu, và phát triển bền vững tại Khoa xây dựng, trường Đại học Mỏ Địa chất, phường Đức Thắng, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội đã hỗ trợ tài liệu nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. H. Long, S. M. Olson, T. D. Stark, and E. A. Samara, "Differential movement at embankment-bridge structure interface in Illinois," *Transportation Research Record*, vol. 1633, no. 1, pp. 53–60, 1998.
- [2] I. Rapti, F. Lopez-Caballero, A. Modaressi-Farahmand-Razavi, A. Foucault, and F. Voldoire, "Liquefaction analysis and damage evaluation of embankment-type structures," *Acta Geotechnica*, vol. 13, no. 5, pp. 1041–1059, 2018.
- [3] M. Arsyad, I. B. Mochtar, N. E. Mochtar, and Y. F. Arifin, "Road embankment full-scale investigation on soft soil with geotextile stabilization," *GEOMATE Journal*, vol. 19, no. 71, pp. 145–152, 2020.
- [4] J.-L. Zheng, R. Zhang, and H.-P. Yang, "Highway subgrade construction in expansive soil areas," *Journal of materials in Civil Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 154–162, 2009.
- [5] J. Davidovits, "Geopolymer cement a review," *Geopolymer Science and Technics, Technical Paper #21*, Geopolymer Institute Library, 2013.
- [6] J. L. Provis, "Alkali-activated materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 40–48, 2018.
- [7] J. L. Provis and J. S. Van Deventer, *Alkali activated materials: state-of-the-art report*, RILEM TC 224-AAM, vol. 13. Springer Science & Business Media, 2013.
- [8] T. B. Nguyen, T. T. Nguyen, and H. Q. Dinh, "In situ test results on the application of Alkali-activated concrete using fly ash and blast furnace slag," (in Vietnamese), *Journal of Water Resource and Technology*, Vietnam Academy for Water Resource, vol. 63, pp. 73-83, 2020.
- [9] V. H. Tran, "Investigation in compositions, properties of fly ash based geopolymer concrete and application to bridge - tunnel structures," Doctoral Dissertation in Transport Construction Engineering, (in Vietnamese), University of Transport and Communications, 2017.
- [10] H. S. Trinh, "An experimental research on assesment of foremost properties of fly ash-based geopolymer using steel slag aggregate in road construction in Vietnam," Doctoral Dissertation in Transport Construction Engineering, (in Vietnamese), University of Transport and Communications, 2020.
- [11] V. T. Tran, "Research on clay mud structure reinforcement to improvement soft soil base on geopolymer technology," Doctoral Dissertation, (in Vietnamese), University of Technology - Vietnam National University, Ho Chi Minh City, 2021.
- [12] Q. N. Kieu and A. D. Nguyen, "Geopolymer binders in production of non-fired construction materials," (in Vietnamese), *Proceeding-70th anniversary of Geology and Minerals sector of Vietnam*. Publishing House for Science and Technology, 2015, pp. 647-658.
- [13] T.-P. Ngo, Q.-B. Bui, V. T.-A. Phan, and H.-B. Tran, "Durability of geopolymer stabilised compacted earth exposed to wetting–drying cycles at different conditions of pH and salt," *Construction and Building Materials*, vol. 329, 2022, Art. no. 127168.
- [14] British Standards Institution, *BS:5628-1978, Code of practice for structural use of masonry, Part 1: Unreinforced masonry*. London, 1978.
- [15] D. R. Biswal, U. C. Sahoo, and S. R. Dash, "Characterization of granular lateritic soils as pavement material," *Transportation Geotechnics*, vol. 6, pp. 108–122, 2016.
- [16] D. A. Alao, "Geology and engineering properties of laterites from Ilorin, Nigeria," *Engineering geology*, vol. 19, no. 2, 1983, Art. no. 2.
- [17] C. A. Oyelami and J. L. Van Rooy, "A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 119, pp. 226–237, 2016.
- [18] M. Pinard, D. F. Netterberg, and D. P. Paige-Green, "Review of specifications for the use of laterite in road pavements," Final Report of Contract AFCAP/GEN/124: Association of Southern Africa National Road Agency, UK Department of International Development, 2014.

- [19] National Institute for Soils and Fertilizers, "The basic information of main soil units of Vietnam," Hanoi: Thegioi Publishers, 2002. [Online]. Available: <https://data.opendevlopmentmekong.net/dataset/db437824-1e2f-4bef-9338-0634a647cf59/resource/987f1f13-b4cd-4d6c-8475-294fa2a4b5a4/download/basic-information-of-main-soil-units-in-vietnam-.compressed.pdf>. [Accessed Oct. 30, 2022].
- [20] K. C. Onyelowe, V. D. Bui, P. L. Dao, F. Onyelowe, C. Ikra, C. Ezugwu, A. B. Salahudeen, M. Maduabuchi, J. Obimba-Wogu, K. Ibe, and L. Ihenna, "Evaluation of index and compaction properties of lateritic soils treated with quarry dust based geopolymer cement for subgrade purpose," *Epitoanyag-Journal of Silicate Based and Composite Materials*, no. 1, pp. 12–15, 2020.
- [21] C. Hengels, H. Collado, T. Droguett, S. Sánchez, M. Vesely, P. Garrido, and S. Palma, "Factors affecting the compressive strength of geopolymers: A review," *Minerals*, vol. 11, no. 12, 2021, Art. no. 1317.
- [22] E. Chong, M. King, K. E. Marak, and M. A. Freedman, "The effect of crystallinity and crystal structure on the immersion freezing of alumina," *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 123, no. 12, pp. 2447–2456, 2019.
- [23] J. Davidovits, "Properties of geopolymer cements," in *First international Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1994, pp. 131–149.
- [24] H.-B. Le, Q.-B. Bui, and L. Tang, "Geopolymer recycled aggregate concrete: from experiments to empirical models," *Materials*, vol. 14, no. 5, 2021, Art. no. 1180.
- [25] H. T. Nguyen and P. T. Dang, "Fly Ash-Based Geopolymer: Green Material in Carbon-Constrained Society," in *Solid State Phenomena*, Trans Tech Publ., 2021, pp. 65–71.
- [26] M. Torres-Carrasco and F. Puertas, "Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation," *Journal of cleaner Production*, vol. 90, pp. 397–408, 2015.
- [27] N. H. Luong, "A research on the use of fly ash as reinforcing filler element for rubber and rubber blend materials," Doctoral Dissertation in Chemistry, Vietnam Academy of Science and Technology, 2015.
- [28] I. Luhar, S. Luhar, M. Abdullah, M. Nabiałek, A. Sandu, J. Szmidla, A. Jurczyńska, R. Razak, I. Aziz, N. Jamil, and L. Deraman, "Assessment of the Suitability of Ceramic Waste in Geopolymer Composites: An Appraisal," *Materials*, vol. 14, no. 12, 2021, Art. no. 3279.
- [29] Y. G. Adewuyi, "Recent advances in fly-ash-based geopolymers: potential on the utilization for sustainable environmental remediation," *ACS omega*, vol. 6, no. 24, pp. 15532–15542, 2021.
- [30] M. Vafaei and A. Allahverdi, "High strength geopolymer binder based on waste-glass powder," *Advanced Powder Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 215–222, 2017.
- [31] J. Davidovitsa, L. Huamanb, and R. Davidovitsa, "Tiahuanaco monuments (Tiwanaku/Pumapunku) in Bolivia are made of geopolymer artificial stones created 1400 years ago," in *Conference: Geopolymer Camp*, 2019, doi:10.13140/RG.2.2.31223.16800.
- [32] D. Parthiban, D.S. Vijayan, E. Koda, M.D. Vaverkova, K. Piechowicz, P. Osinski, and D. B. Van, "Role of Industrial based Precursors in the Stabilization of weak soils with geopolymer - A Review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, no. 5, 2022, Art. no. e00886.
- [33] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999.
- [34] C. D. F. Rogers and S. Glendinning, "Modification of clay soils using lime," in *Lime Stabilisation: Proceedings of the seminar*, Thomas Telford Publishing, 1996, pp. 99–114.
- [35] D. T. Bergado, L. R. Anderson, N. Miura, and A. S. Balasubramaniam, *Soft ground improvement in lowland and other environments*. American Society of Civil Engineers, New York, NY: ASCE, 1996.
- [36] P. Sargent, "The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation," in *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, Elsevier, 2015, pp. 555–604.
- [37] J. R. Prusinski and S. Bhattacharja, "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils," *Transportation research record*, vol. 1652, no. 1, pp. 215–227, 1999.
- [38] F. S. Rostler and W. M. Kunkel, "Soil stabilization," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 56, no. 4, pp. 27–33, 1964.
- [39] L. K. Davidson, T. Demirel, and R. L. Handy, "Soil pulveration and lime migration in soil-lime stabilization," *Highway Research Record*, no. 92, pp.103-126, 1965.
- [40] Z. Liu, C. S. Cai, F. Liu, and F. Fan, "Feasibility study of loess stabilization with fly ash-based geopolymer," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 5, 2016, Art. no. 04016003.

- [41] M. Hoy, R. Rachan, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, and M. Mirzababaei, "Effect of wetting–drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement–Fly ash geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 624–634, 2017.
- [42] H. Xu and J. S. Van Deventer, "Effect of source materials on geopolymerization," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 8, pp. 1698–1706, 2003.
- [43] S. Thokchom, K. K. Mandal, and S. Ghosh, "Effect of Si/Al ratio on performance of fly ash geopolymers at elevated temperature," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 977–989, 2012.
- [44] B. Singhi, A. I. Laskar, and M. A. Ahmed, "Investigation on soil–geopolymer with slag, fly ash and their blending," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 393–400, 2016.
- [45] G. Davis, C. Montes, and S. Eklund, "Preparation of lunar regolith based geopolymer cement under heat and vacuum," *Advances in Space Research*, vol. 59, no. 7, pp. 1872–1885, 2017.
- [46] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. Van Deventer, "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, 2005.
- [47] J. S. J. V. Deventer, J. L. Provis, P. Duxson, and G. C. Lukey, "Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 139, no. 3, 2007, Art. no. 3.
- [48] P. K. Sarker, S. Kelly, and Z. Yao, "Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete," *Materials & Design*, vol. 63, pp. 584–592, 2014.
- [49] J. N. Fekoua, C. R. Kaze, L. L. Duna, A. Ghazouni, I. M. Ndassa, E. Kamseu, S. Rossignol, and C. Leonelli, "Effects of curing cycles on developing strength and microstructure of goethite-rich aluminosilicate (corroded laterite) based geopolymer composites," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 270, 2021, Art. no. 124864.
- [50] S. Adhikari, M. J. Khattak, and B. Adhikari, "Mechanical characteristics of Soil-RAP-Geopolymer mixtures for road base and subbase layers," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 483–496, 2020.
- [51] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, and P. Chindaprasirt, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature," *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2118–2124, 2011.
- [52] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer," *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 12, pp. 1073–1078, 2009.
- [53] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste," *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, pp. 9–14, 2014.
- [54] I. Phummiphan, S. Horpibulsuk, P. Sukmak, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, and S.-L. Shen, "Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 17, no. 4, pp. 877–891, 2016.
- [55] J. Davidovits, "Geopolymers and geopolymeric materials," *Journal of Thermal Analysis*, vol. 35, no. 2, pp. 429–441, 1989.
- [56] B. Adhikari, M. J. Khattak, and S. Adhikari, "Mechanical and durability characteristics of flyash-based soil-geopolymer mixtures for pavement base and subbase layers," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, no. 9, pp. 1193–1212, 2021.