

VẬT LIỆU GEOPOLYMER TỪ PHỤ PHẨM LÒ CAO

Đặt vấn đề

Ngành sản xuất xi măng ở Việt Nam vừa đóng vai trò quan trọng trong phát triển hạ tầng, vừa là nguồn phát thải khí nhà kính lớn, khi quá trình nung clinker tiêu thụ nhiều năng lượng và phát thải CO₂ đáng kể. Theo Hiệp hội Xi măng Việt Nam, cả nước hiện có 92 dây chuyền sản xuất với tổng công suất trên 122 triệu tấn/năm, nhưng năm 2024 chỉ tiêu thụ khoảng 95 triệu tấn xi măng và clinker, trong đó tiêu thụ nội địa 65,3 triệu tấn. Ngành xi măng được coi là một trong những ngành công nghiệp phát thải carbon lớn nhất, gây áp lực lớn trong lộ trình giảm phát thải của Việt Nam.

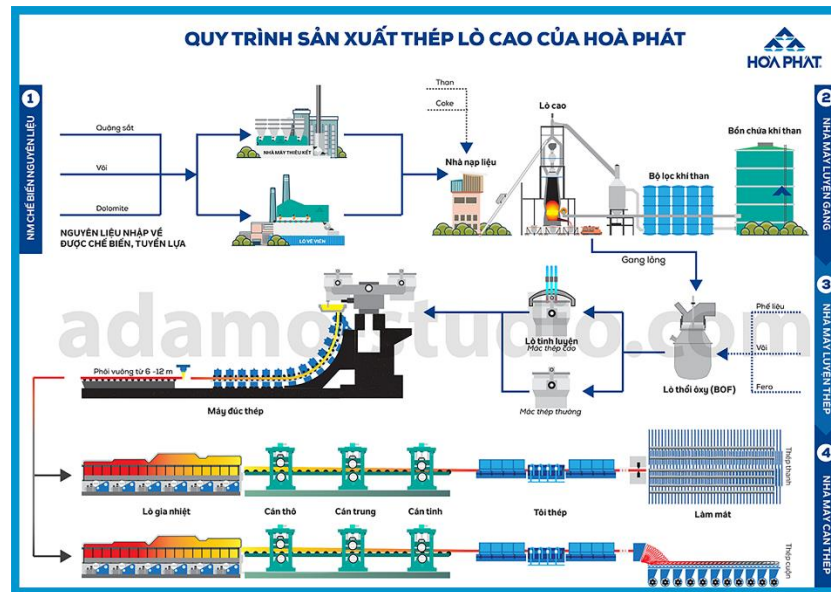
Trong bối cảnh đất nước đang triển khai các mục tiêu giảm phát thải, hướng tới tăng trưởng xanh và phát triển bền vững, việc tìm kiếm vật liệu xây dựng thay thế xi măng truyền thống trở thành yêu cầu cấp thiết. Geopolymer, đặc biệt khi được tổng hợp từ phụ phẩm công nghiệp như xỉ lò cao của ngành luyện thép – loại chất thải giàu CaO, SiO₂ và Al₂O₃, nổi lên như một giải pháp phù hợp: vừa tận dụng nguồn chất thải rắn dồi dào, vừa giảm thiểu ô nhiễm môi trường, đồng thời tạo ra vật liệu có tính chất cơ học và hóa học vượt trội. Theo Viện Luyện kim đen, mỗi năm ngành luyện gang thép Việt Nam thải ra hàng triệu tấn xỉ, phần lớn chưa được tái sử dụng hiệu quả.

Điều này hoàn toàn phù hợp với tinh thần *Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22/12/2024 của Bộ Chính trị* về đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia, trong đó nhấn mạnh khoa học công nghệ là động lực chủ yếu để tái cấu trúc nền kinh tế, nâng cao năng lực cạnh tranh quốc gia và thúc đẩy kinh tế tuần hoàn. Việc nghiên cứu và ứng dụng geopolymer từ xỉ lò cao không chỉ mang ý nghĩa khoa học trong việc làm rõ cơ chế phản ứng và tối ưu hóa quy trình sản xuất, mà còn mang ý nghĩa thực tiễn khi góp phần xây dựng hạ tầng bền vững, giảm chi phí, nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành vật liệu xây dựng Việt Nam trong giai đoạn mới.

1. Giới thiệu về geopolymer

Geopolymer là một loại vật liệu vô cơ mới được giáo sư Joseph Davidovits giới thiệu từ thập niên 1970, hình thành thông qua phản ứng polycondensation của các hợp chất giàu aluminosilicate trong môi trường kiềm mạnh, khác biệt với xi măng Portland vốn dựa trên quá trình thủy hóa clinker. Vật liệu này có nhiều đặc tính nổi bật như cường độ nén cao (40–80 MPa sau 28 ngày), khả năng kháng axit và sunfat, chịu nhiệt lên tới 800–1000°C, đồng thời giảm phát thải CO₂ tới 60–80% so với xi măng truyền thống, nhờ đó được coi là vật liệu xanh thân thiện với môi trường. Geopolymer có thể được tổng hợp từ nhiều nguồn nguyên liệu khác nhau

như tro bay từ các nhà máy nhiệt điện, xỉ lò cao hạt hóa từ ngành luyện gang thép, metakaolin từ đất sét nung hay các phụ phẩm công nghiệp khác như bùn đỏ và tro trấu. Trong bối cảnh Việt Nam đang triển khai Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021–2030 và thực hiện Nghị quyết số 57-NQ/TW của Bộ Chính trị về phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia, geopolimer được xem là giải pháp tiềm năng để tận dụng nguồn phụ phẩm công nghiệp dồi dào, giảm phát thải khí nhà kính, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn và nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành vật liệu xây dựng trong giai đoạn mới.



2. Tổng quan về geopolimer

Geopolymer là một nhóm vật liệu vô cơ mới được nghiên cứu và phát triển từ thập niên 1970, dựa trên phản ứng geopolymer hóa của các hợp chất aluminosilicate trong môi trường kiềm. Khác với xi măng Portland truyền thống, vốn hình thành từ quá trình thủy hóa clinker, geopolimer được tạo ra nhờ sự hòa tan và tái cấu trúc các hạt aluminosilicate, tạo nên mạng lưới polymer vô cơ ba chiều có độ bền cao và khả năng kháng hóa chất vượt trội.

Lịch sử phát triển

- Khái niệm geopolimer được giáo sư Joseph Davidovits đưa ra lần đầu tiên vào năm 1978, mở ra hướng nghiên cứu về vật liệu thay thế xi măng Portland.
- Từ đó đến nay, nhiều công trình nghiên cứu quốc tế đã chứng minh tiềm năng ứng dụng rộng rãi của geopolimer trong xây dựng, công nghiệp chịu nhiệt và xử lý môi trường.
- Tại Việt Nam, các viện nghiên cứu và trường đại học đã bắt đầu triển khai thí nghiệm sản xuất gạch không nung, bê tông geopolimer từ tro bay và xỉ lò cao, phù hợp với định hướng phát triển vật liệu xanh.

Nguyên liệu chính

Geopolymer có thể được tổng hợp từ nhiều nguồn aluminosilicate khác nhau:

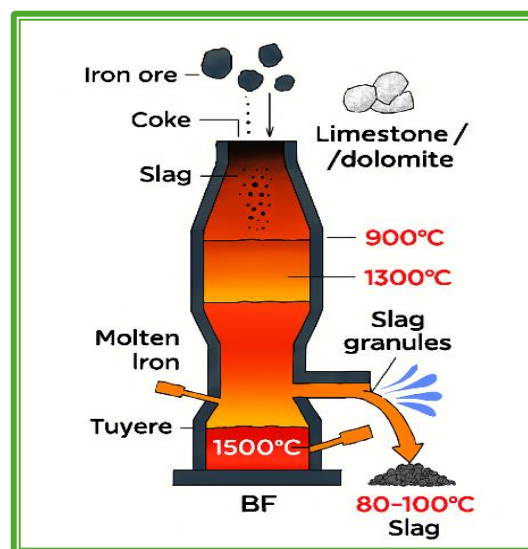
- Tro bay từ các nhà máy nhiệt điện than – nguồn phụ phẩm dồi dào tại Việt Nam.
- Xi lò cao hạt hóa từ ngành luyện gang thép – giàu CaO , SiO_2 và Al_2O_3 .
- Metakaolin từ đất sét nung.
- Phụ phẩm công nghiệp khác như bùn đỏ (từ sản xuất alumin), tro trấu.

Cơ chế phản ứng

- **Giai đoạn hòa tan:** Các hạt aluminosilicate được hòa tan trong dung dịch kiềm (NaOH , KOH).
- **Giai đoạn tái cấu trúc:** Các ion Si và Al tái sắp xếp, hình thành mạng lưới polymer vô cơ ba chiều.
- **Giai đoạn đóng rắn:** Vật liệu đạt cường độ cơ học cao, ổn định về hóa học và nhiệt.

3. Nguồn phụ phẩm lò cao

Xi lò cao là phụ phẩm sinh ra trong quá trình luyện gang bằng lò cao, khi quặng sắt, than cốc và đá vôi được đưa vào phản ứng ở nhiệt độ cao. Trong quá trình này, các tạp chất không mong muốn (silic, nhôm, magiê, lưu huỳnh...) kết hợp với chất trợ dung tạo thành xỉ, được tách ra khỏi kim loại nóng chảy. Sau khi làm nguội nhanh bằng nước, xỉ lò cao tạo thành dạng hạt hóa có hoạt tính pozzolan cao, rất phù hợp để sử dụng làm nguyên liệu cho geopolimer.



Thành phần hóa học

- **CaO (30–50%):** tạo tính kiềm và khả năng phản ứng cao.
- **SiO_2 (28–38%):** thành phần chính tham gia vào mạng lưới geopolimer.
- **Al_2O_3 (8–24%):** tăng cường khả năng kháng hóa chất và độ bền cơ học.
- **MgO , Fe_2O_3 và các oxit khác:** góp phần điều chỉnh tính chất vật liệu.

Thành phần này giúp xỉ lò cao có hoạt tính thủy lực và khả năng phản ứng tốt trong môi trường kiềm, tương tự như tro bay nhưng giàu canxi hơn, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình geopolymer hóa.



Thực trạng tại Việt Nam

- Ngành luyện gang thép Việt Nam hiện có nhiều nhà máy lớn như Hòa Phát, Formosa Hà Tĩnh, Thái Nguyên... với sản lượng thép hàng chục triệu tấn mỗi năm.
- Theo Viện Luyện kim đen, mỗi năm ngành thép thải ra hàng triệu tấn xỉ lò cao, trong đó phần lớn chưa được tái sử dụng hiệu quả, chủ yếu dùng san lấp hoặc tồn kho.
- Đây là nguồn nguyên liệu dồi dào, nếu được tận dụng để sản xuất geopolymer sẽ vừa giảm gánh nặng xử lý chất thải, vừa tạo ra vật liệu xây dựng xanh.

Tiềm năng ứng dụng

- **Trong xây dựng:** Xỉ lò cao nghiền mịn có thể thay thế một phần xi măng Portland hoặc làm nguyên liệu chính cho geopolymer.
- **Trong kinh tế tuần hoàn:** Tận dụng chất thải công nghiệp, giảm chi phí xử lý, đồng thời tạo ra sản phẩm có giá trị gia tăng.
- **Trong nghiên cứu khoa học:** Là nguồn aluminosilicate giàu canxi, giúp mở rộng phạm vi nghiên cứu geopolymer tại Việt Nam, phù hợp với định hướng phát triển khoa học công nghệ theo *Nghị quyết 57-NQ/TW (2024)*.

4. Quy trình về tổng hợp vật liệu geopolymer

Chuẩn bị nguyên liệu

- **Nguồn aluminosilicate:** Tro bay, xỉ lò cao hạt hóa, metakaolin hoặc các phụ phẩm công nghiệp khác.

- **Yêu cầu xử lý:** Nguyên liệu cần được nghiền mịn (kích thước hạt < 75 μm) để tăng diện tích bề mặt phản ứng.
- **Đặc điểm tại Việt Nam:** Tro bay từ các nhà máy nhiệt điện than và xỉ lò cao từ ngành luyện thép là nguồn nguyên liệu dồi dào, thuận lợi cho sản xuất geopolimer.

Pha dung dịch kiềm hoạt hóa

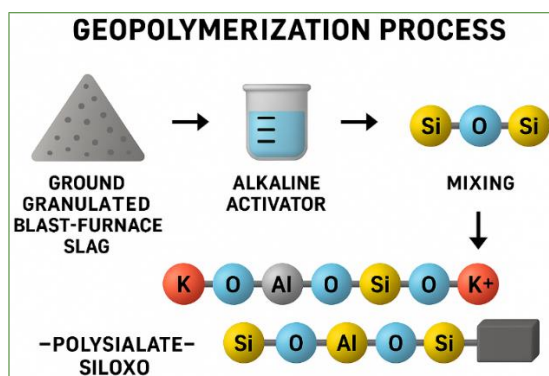
- **Thành phần chính:** NaOH hoặc KOH kết hợp với dung dịch natri silicat (Na_2SiO_3).
- **Nồng độ:** Thường sử dụng dung dịch NaOH 8–12M để đảm bảo khả năng hòa tan aluminosilicate.
- **Tỷ lệ:** Tỷ lệ $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ trong dung dịch hoạt hóa ảnh hưởng trực tiếp đến cường độ và độ bền của geopolimer.

Quá trình trộn

- **Phương pháp:** Trộn bột aluminosilicate với dung dịch kiềm theo tỷ lệ thích hợp để tạo hỗn hợp đồng nhất.
- **Yếu tố ảnh hưởng:**
 - Tỷ lệ dung dịch kiềm/bột rắn.
 - Thời gian và tốc độ trộn.
 - Nhiệt độ môi trường.

Đổ khuôn và tạo hình

- Hỗn hợp geopolimer sau khi trộn được đưa vào khuôn để định hình (gạch, khối bê tông, mẫu thí nghiệm).
- Có thể bổ sung cốt liệu (cát, đá) để tạo bê tông geopolimer.



Dưỡng hộ

- **Phương pháp dưỡng hộ:**
 - Ở nhiệt độ thường (25–30°C).
 - Ở nhiệt độ cao (40–80°C) để thúc đẩy phản ứng geopolimer hóa nhanh hơn.
- **Thời gian:** Tùy thuộc vào loại nguyên liệu và dung dịch kiềm, thường từ 24 giờ đến 28 ngày.

- **Kết quả:** Vật liệu đạt cường độ cơ học cao, ổn định về hóa học và nhiệt.

Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng geopolimer

- **Tỷ lệ Si/Al:** Quyết định cấu trúc mạng lưới polymer vô cơ.
- **Nồng độ dung dịch kiềm:** Ảnh hưởng đến tốc độ hòa tan và tái cấu trúc aluminosilicate.
- **Nhiệt độ dưỡng hộ:** Nhiệt độ cao giúp tăng tốc độ phản ứng nhưng có thể gây co ngót nếu không kiểm soát tốt.
- **Độ mịn nguyên liệu:** Nguyên liệu càng mịn thì phản ứng càng hiệu quả.

Thực tiễn tại Việt Nam

- Các nghiên cứu tại Viện Vật liệu Xây dựng và một số trường đại học đã thử nghiệm quy trình tổng hợp geopolimer từ tro bay và xỉ lò cao, cho kết quả cường độ nén đạt trên 50 MPa sau 28 ngày.
- Việc chuẩn hóa quy trình sản xuất geopolimer là cần thiết để mở rộng ứng dụng trong xây dựng hạ tầng, phù hợp với định hướng phát triển vật liệu xanh và kinh tế tuần hoàn theo *Nghị quyết 57-NQ/TW (2024)*.

5. Tính chất và đặc trưng của vật liệu geo polymer phụ phẩm lò cao

Tính chất cơ học

- **Cường độ nén:** Geopolimer từ xỉ lò cao có thể đạt cường độ nén từ 40–80 MPa sau 28 ngày, tương đương hoặc vượt trội so với bê tông xi măng Portland.
- **Độ bền uốn và kéo:** Nhờ cấu trúc mạng aluminosilicate giàu canxi, vật liệu có độ bền uốn cao hơn, ít nứt gãy hơn so với bê tông truyền thống.
- **Độ co ngót:** Co ngót thấp, hạn chế hiện tượng nứt trong quá trình đóng rắn và sử dụng lâu dài.

Tính chất hóa học

- **Kháng axit và sunfat:** Geopolimer từ xỉ lò cao có khả năng chống lại sự ăn mòn trong môi trường axit và dung dịch sunfat, phù hợp cho công trình tiếp xúc với nước biển hoặc môi trường hóa chất.
- **Ổn định hóa học:** Cấu trúc mạng lưới aluminosilicate giúp vật liệu ít bị phân hủy, duy trì độ bền lâu dài.
- **Khả năng cố định kim loại nặng:** Geopolimer có thể hấp thụ và cố định các ion kim loại nặng, góp phần xử lý chất thải công nghiệp.

Tính chất nhiệt

- **Khả năng chịu nhiệt:** Geopolimer từ xỉ lò cao có thể chịu được nhiệt độ lên tới 800–1000°C, không bị mất cường độ đáng kể, thích hợp cho các ứng dụng chịu lửa.

- **Khả năng cách nhiệt:** Cấu trúc đặc và ổn định giúp vật liệu có khả năng cách nhiệt tốt hơn so với bê tông xi măng.

Tính chất môi trường

- **Giảm phát thải CO₂:** Quá trình sản xuất geopolymers từ xỉ lò cao giảm tới 60–80% lượng CO₂ so với xi măng Portland, góp phần vào mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính của Việt Nam.
- **Tận dụng chất thải công nghiệp:** Biến xỉ lò cao – vốn là phụ phẩm gây ô nhiễm – thành nguyên liệu có giá trị, phù hợp với mô hình kinh tế tuần hoàn.
- **Thân thiện môi trường:** Giảm nhu cầu khai thác đá vôi và đất sét, hạn chế suy thoái tài nguyên thiên nhiên.

Đặc trưng so với xi măng Portland

- **Cường độ và độ bền:** Tương đương hoặc cao hơn.
- **Khả năng kháng hóa chất và chịu nhiệt:** Vượt trội hơn.
- **Phát thải CO₂:** Thấp hơn đáng kể.
- **Nguồn nguyên liệu:** Tận dụng phụ phẩm công nghiệp thay vì khai thác tài nguyên thiên nhiên.

6. Ứng dụng thực tiễn

Trong xây dựng hạ tầng

- **Bê tông geopolymers:**
Có thể thay thế bê tông xi măng truyền thống trong các công trình cầu đường, nhà cao tầng, hạ tầng đô thị.
Cường độ nén cao, khả năng kháng hóa chất và chịu nhiệt tốt giúp tăng tuổi thọ công trình.
- **Gạch không nung geopolymers:**
Sản xuất từ xỉ lò cao và tro bay, không cần nung ở nhiệt độ cao, giảm tiêu thụ năng lượng.
Đáp ứng tiêu chuẩn vật liệu xây dựng xanh, phù hợp với chương trình phát triển gạch không nung của Bộ Xây dựng Việt Nam.

Trong công nghiệp chịu nhiệt và chống cháy

Geopolymer có khả năng chịu nhiệt lên tới 1000°C, thích hợp cho:

- Vật liệu lót lò công nghiệp.
- Tấm chống cháy trong các công trình dân dụng và công nghiệp.
- Vật liệu cách nhiệt cho ngành năng lượng.

Trong xử lý môi trường

- **Cố định kim loại nặng:** Geopolymer có khả năng hấp thụ và cố định các ion kim loại nặng, giúp xử lý chất thải công nghiệp nguy hại.

- **Ổn định chất thải rắn:** Có thể sử dụng geopolimer để ổn định tro xỉ, bùn đỏ, giảm nguy cơ rò rỉ chất độc hại ra môi trường.
- **Giảm phát thải CO₂:** Ứng dụng geopolimer trong xây dựng giúp giảm đáng kể lượng khí nhà kính, phù hợp với mục tiêu giảm phát thải của Việt Nam đến năm 2030.

Trong kinh tế tuần hoàn

- **Tận dụng phụ phẩm công nghiệp:** Xi lò cao, tro bay, bùn đỏ – vốn là chất thải – được biến thành nguyên liệu có giá trị.
- **Giảm chi phí xử lý chất thải:** Doanh nghiệp thép và nhiệt điện có thể giảm gánh nặng xử lý, đồng thời tạo ra sản phẩm thương mại.
- **Tạo giá trị gia tăng:** Biến chất thải thành vật liệu xây dựng chất lượng cao, góp phần nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành vật liệu Việt Nam.



7. Kết luận và Khuyến nghị

Kết luận

Qua nội dung đã trình bày có thể khẳng định rằng geopolimer từ phụ phẩm lò cao là một hướng đi đầy tiềm năng cho ngành vật liệu xây dựng Việt Nam. Vật liệu này không chỉ có cường độ cơ học cao, khả năng kháng hóa chất và chịu nhiệt vượt trội, mà còn giúp giảm phát thải CO₂ tới 60–80% so với xi măng Portland, phù hợp với mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính trong Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021–2030. Đồng thời, việc tận dụng xỉ lò cao – nguồn chất thải công nghiệp dồi dào từ ngành luyện thép – góp phần giải quyết vấn đề môi trường, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn, và nâng cao năng lực cạnh tranh của ngành vật liệu xây dựng. Đây là minh chứng rõ ràng cho việc kết hợp giữa khoa học công nghệ và thực tiễn sản xuất, phù hợp với tinh thần Nghị quyết số 57-NQ/TW (2024) về phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia.

Khuyến nghị

1. Về nghiên cứu khoa học:

Đẩy mạnh các đề tài nghiên cứu thực nghiệm về geopolimer từ xỉ lò cao tại các viện nghiên cứu, trường đại học và doanh nghiệp.

Tập trung vào việc tối ưu hóa quy trình tổng hợp, xác định tỷ lệ dung dịch kiềm, điều kiện dưỡng hộ và các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng vật liệu.

2. Về chính sách và quản lý:

Bộ Xây dựng và Bộ Khoa học & Công nghệ cần xây dựng tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia cho vật liệu geopolimer, tạo cơ sở pháp lý cho việc ứng dụng rộng rãi.

Chính phủ cần có cơ chế khuyến khích doanh nghiệp thép và xi măng hợp tác sản xuất geopolimer, thông qua ưu đãi thuế, hỗ trợ vốn và chuyển giao công nghệ.

3. Về ứng dụng thực tiễn:

Thí điểm sử dụng bê tông geopolimer trong các công trình hạ tầng trọng điểm (cầu, đường, nhà cao tầng) để đánh giá hiệu quả thực tế.

Khuyến khích sản xuất gạch không nung geopolimer, thay thế dần gạch đất nung truyền thống, góp phần giảm khai thác đất sét và phát thải khí nhà kính.

4. Về kinh tế tuần hoàn:

Tận dụng nguồn xỉ lò cao và tro bay từ các nhà máy luyện thép, nhiệt điện để sản xuất vật liệu xây dựng, giảm chi phí xử lý chất thải.

Xây dựng mô hình liên kết giữa doanh nghiệp thép, xi măng và vật liệu xây dựng nhằm hình thành chuỗi giá trị bền vững.

5. Về định hướng lâu dài:

Đưa geopolimer vào chiến lược phát triển vật liệu xây dựng xanh của Việt Nam.

Gắn kết nghiên cứu và ứng dụng geopolimer với mục tiêu giảm phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050, phù hợp với cam kết quốc tế của Việt Nam tại COP26.

Nguồn tham khảo và trích dẫn

- [1] Davidovits, J. (1991). *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials*. Journal of Materials Education.
- [2] Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). *The geopolimerisation of alumino-silicate minerals*. International Journal of Mineral Processing.
- [3] Duxson, P., et al. (2007). *Geopolymer technology: the current state of the art*. Journal of Materials Science.
- [4] Bộ Chính trị (2024). *Nghị quyết số 57-NQ/TW về phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia*.
- [5] Hiệp hội Xi măng Việt Nam – Báo cáo ngành xi măng và vật liệu xây dựng 2024.
- [6] Viện Luyện kim đen Việt Nam – Báo cáo về quản lý và sử dụng xỉ luyện gang thép.

- [7] Hiệp hội Thép Việt Nam (VSA) – Số liệu sản lượng thép và phụ phẩm hằng năm.
- [8] Joseph Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications, Geopolymer Institute; 2nd Edition, January 2008.
- [9] T.W. Cheng, J.P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering* 16 (2003) 205–210.
- [10] Pan, Z., K. N. Feng, K. Gong, B. Zou, A. H. Korayem, J. Sanjayan, W. H. Duan, and F. Collins. 2012. “Damping and microstructure of fly ash-based geopolymers.” *J. Mater. Sci.* 48 (8): 3128–3137.
- [11] Joseph Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications, Geopolymer Institute; 2nd Edition, January 2008.
- [12] T.W. Cheng, J.P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering* 16 (2003) 205–210
- [13] Pan, Z., K. N. Feng, K. Gong, B. Zou, A. H. Korayem, J. Sanjayan, W. H. Duan, and F. Collins. 2012. “Damping and microstructure of fly ash-based geopolymers.” *J. Mater. Sci.* 48 (8): 3128–3137.
- [14] Ying Lou, Sixiang Kang, Wenda Wu, Xuefang Wang, Huaqiang Sun, Feng Chen, Maolong Xu, Sulfate resistance of recycled powder-slag-based geopolymers under different erosive environments, *Construction and Building Materials*, 462 (2025) 139950.
- [15] Kirubajiny Pasupathy, Jay Sanjayan, Pathmanathan Rajeev, David W. Law, The effect of chloride ingress in reinforced geopolymer concrete exposed in the marine environment, *Journal of Building Engineering*, *Journal of Building Engineering* 39 (2021) 102281.
- [16] Oswaldo Burciaga-Díaz and Jose Iv an Escalante-Garcia, Structure, Mechanisms of Reaction, and Strength of an Alkali-Activated, Blast-Furnace Slag, *J. Am. Ceram. Soc.*, 96 [12] 3939–3948 (2013)
- [17] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J.S. Dolado, A. Ricof, J. Rodríguez, A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements, *Journal of the European Ceramic Society* 31 (2011) 2043–2056
- [18] U.A. Birnin-Yauri1 and F.P. Glasser, FRIEDEL’S SALT, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl},\text{OH})_z\cdot 2\text{H}_2\text{O}$: ITS SOLID SOLUTIONS AND THEIR ROLE IN CHLORIDE BINDING, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 12, pp. 1713–1723, 1998