

Tổng quan tình hình nghiên cứu vật liệu cao phân tử khoáng

Nguyễn Văn Hiệu* và Nguyễn Bích Hà

Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Ngày nhận bài 26/8/2019; ngày chuyển phản biện 28/8/2019; ngày nhận phản biện 20/9/2019; ngày chấp nhận đăng 26/9/2019

Tóm tắt:

Trong bài tổng quan ngắn gọn này, các tác giả trình bày vắn tắt những kết quả điển hình về vật liệu cao phân tử khoáng được chế tạo từ tro bay của các nhà máy nhiệt điện đốt than, tro đốt rác thải của các nhà máy đốt rác phát điện và xỉ luyện kim do các nhà máy luyện kim thải ra. Các kết quả đó được trình bày trong 15 bài báo điển hình trong số hàng trăm bài báo đã được công bố trên nhiều tạp chí khoa học quốc tế trong 20 năm gần đây. Các kết quả chính của mỗi bài báo trong số 15 bài báo nêu trên bao gồm các thông tin sau đây: các chất liên kết rắn và các chất kích hoạt kiềm được sử dụng, nhiệt độ sấy và thời gian sấy các mẫu vật liệu, độ bền nén của mẫu vật liệu có độ bền nén cao nhất.

Trong phần “Kết luận và thảo luận”, các tác giả đề xuất hướng nghiên cứu công nghệ vật liệu cao phân tử khoáng ở nước ta.

Từ khóa: cao phân tử khoáng, chất kích hoạt kiềm, độ bền nén, tro bay, tro đốt rác, xỉ luyện kim.

Chỉ số phân loại: 2.5

Mở đầu

Vật liệu cao phân tử khoáng là một loại vật liệu xây dựng có các tính chất rất ưu việt so với bê tông sử dụng xi măng Portland. Vật liệu cao phân tử khoáng do nhà vật liệu học người Pháp Joseph Davidovits phát minh từ năm 1972. Ông vốn là một nhà hóa học cao phân tử. Sau một số vụ hỏa hoạn xảy ra tại Pháp trong khoảng thời gian 1970-1972, gây hậu quả nghiêm trọng mà nguyên nhân là sự bắt lửa của các vật liệu cao phân tử, Davidovits quyết định nghiên cứu vật liệu cao phân tử không bắt lửa và không cháy. Nhằm mục đích đó, năm 1972 Davidovits thành lập công ty nghiên cứu tư nhân Cordi SA, sau này trở thành Geopolymer Institute.

Những kết quả nghiên cứu của Davidovits và các cộng sự đã được cấp các patent sau đây:

- Davidovits J. (1972): FR 2,204,999 và FR 2,46,382; US Patent 3,950,470.

- Davidovits J. and Legrand J.-J. (1974): FR 2,324,427; US Patent 4,028,454 (1977); UK Patent 1,481,479 (1977); German Patent 25,00,151 (1979).

- Davidovits J. (1979): FR 2,464,277 và FR 2,489,290; US Patent 4,349,386.

- Davidovits J. and Sawyer J.L. (1985) US Patent 4,509,985.

Tóm tắt nội dung các patent nêu trên đã được trình bày trong báo cáo tổng quan [1].

Phát minh của Davidovits đã thúc đẩy sự nghiên cứu và sản xuất vật liệu cao phân tử khoáng tại các nước có nền công nghiệp phát

triển, thể hiện ở việc tổ chức hàng loạt các hội nghị khoa học quốc tế lớn. Tại Pháp, tháng 6/1988 Geopolyme Institute đã tổ chức tại University of Technology of Compiègne Hội nghị toàn châu Âu lần thứ nhất về Soft Mineralurgy, gọi tắt là Hội nghị Geopolymer 88, với sự tài trợ của European Economic Commission. 11 năm sau (6/1999), Geopolymer Institute tổ chức Hội nghị quốc tế lần thứ 2 - Geopolymer 99 tại Saint Quentin (Pháp). Hội nghị quốc tế lần thứ 3 Geopolymer 2002 được tổ chức tháng 10/2002 tại University of Melbourne (Úc). Geopolymer 2005 World Congress đã được tổ chức để chào mừng Lễ kỷ niệm lần thứ 26 ngày J. Davidovits thành lập Geopolymer Institute.

Những kết quả nghiên cứu và ứng dụng

Những kết quả nghiên cứu về công nghệ sản xuất vật liệu cao phân tử khoáng đã được triển khai ứng dụng vào việc xây dựng các công trình dân dụng, điển hình nhất là Brisbane West Wellcamp Airport (BWWA), Toowoomba, Queensland. Sân bay này được đưa vào sử dụng phục vụ các chuyến bay thương mại của hãng Qantas Link từ tháng 11/2014.

Ngoài việc được sử dụng để sản xuất bê tông, vật liệu cao phân tử khoáng còn được ứng dụng rộng rãi trong đời sống. Trong bài báo [2], Jaarsveld và các cộng sự đã trình bày tiềm năng ứng dụng sau đây của vật liệu cao phân tử khoáng:

1) Che phủ các đồng rác thải và các bãi chôn lấp cần thiết phải có một cấu trúc rắn chắc với độ bền cao để ngăn nước mưa, hoặc là làm một mái che chắc chắn và an toàn để sử dụng một diện tích nào đó vào mục đích xây dựng.

*Tác giả liên hệ: Email: nvhieue@iop.vast.ac.vn

Review of research on geopolimer

Van Hieu Nguyen* and Bich Ha Nguyen

*Institute of Materials Science,
Vietnam Academy of Science and Technology*

Received 26 August 2019; accepted 26 September 2019

Abstract:

In this short review, we present the most significant results of the research on geopolimer produced from fly ash of the coal-fired power station or fly ash of the municipal solid waste incinerator and ground granulated blast furnace slag. These significant research results were reported in 15 representative articles among hundreds of articles published in international academic journals during the last 20 years. The main results of each article comprised following contents: used solid binders and alkaline activating solutions, curing temperature and curing time, compressive strength of the sample with the highest compressive strength.

In the last section entitled “Conclusion and discussion”, we proposed the directions of the research on geopolimer in Vietnam.

Keywords: alkaline activator, blast-furnace slag, compressive strength, fly ash, geopolimer, waste incineration ash.

Classification number: 2.5

2) Tạo ra một lớp đệm có độ thấm thấu thấp cho các bãi chôn lấp để giảm thiểu sự thất thoát các chất gây ô nhiễm vào nguồn nước, hoặc tạo ra một lớp đệm cho các hồ nước sạch để ngăn cho nước không bị ngấm xuống dưới ở những nơi thiếu đất sét.

3) Xây dựng các tấm ngăn dựng đứng hoặc các cấu trúc điều khiển dòng nước ở những nơi cần đổi hướng dòng nước, cả ở gần mặt nước lẫn sâu trong lòng nước.

4) Xây dựng đập nước hoặc giữ ổn định các đập ngăn quặng thải. Việc xử lý quặng thải ngay tại chỗ để làm tăng thể năng động cứng giúp ích cho sự khai thác quặng ở những vùng nhạy cảm về môi trường, ở đó không thể khai thác mỏ không phải chỉ vì sự đe dọa sạt lở các đập ngăn quặng thải mà còn vì sự rò rỉ các kim loại độc hại vào hệ thống thoát nước thải.

5) Ở những chỗ cần có vật liệu với bề mặt trơn không bị tác động của các phản ứng hóa học, không thấm thấu, không có lỗ rỗng, rẻ tiền và có diện tích rộng để chất lọc quặng và thu gom các

chất đã được chất lọc thì cần sử dụng vật liệu cao phân tử khoáng.

6) Các bề mặt kết cấu như sàn nhà, nhà kho và đường băng trong sân bay.

7) Các tấm ngăn xen kẽ lẫn nhau trong các khối phế thải để giữ cho các khối này cố định và ngăn chặn không cho các lớp khác nhau chất thành đồng, lớp này trên lớp kia. Trong trường hợp này, vật liệu cao phân tử khoáng cần có độ thấm thấu thấp và có độ bền trung bình.

8) Vật liệu cao phân tử khoáng rất hữu dụng đối với hoạt động khai khoáng. Đóng rắn nhanh và sớm đạt được độ bền là hai tính chất ưu việt của vật liệu cao phân tử khoáng cần được phát huy trong hoạt động khai khoáng. Sự dư dật của các loại quặng thải ở mỏ cũng như nhiệt độ tương đối cao trong hầu hết các mỏ đòi hỏi phải áp dụng quá trình trở thành cao phân tử khoáng và rất đáng được nghiên cứu.

9) Những người không phải là chuyên gia cũng có thể thực hiện việc đúc sẵn các cấu kiện đơn giản bằng bê tông cao phân tử khoáng như làm hàng rào, làm các tấm lát vỉa hè hoặc làm các ống dẫn nước rẻ tiền. Nói chung, tính chất dễ đổ khuôn cùng với độ co ngót của kem cao phân tử khoáng so với xi măng Portland là rất thuận tiện để cho những người không chuyên nghiệp có thể dễ sử dụng.

10) Cố định các chất thải độc hại như arsenic, thủy ngân và chì. Có thể đây sẽ là một trong những lĩnh vực ưu tiên mà sự trở thành vật liệu cao phân tử khoáng có thể tác động lên hiện trạng. Tuy nhiên vấn đề này hiện nay chưa được quan tâm đúng mức và rất đáng được nghiên cứu.

11) Thực hiện việc đóng gói không tốn kém nhưng lại lâu bền các chất thải độc hại như amiăng và chất thải phóng xạ. So với việc sử dụng vật liệu cao phân tử khoáng thì việc sử dụng xi măng Portland quá tốn kém mà lại không bền.

12) Mọi vật liệu xây dựng thông thường như gạch, ngói và xi măng đều có thể được thay thế bằng vật liệu cao phân tử khoáng.

Cách đây tròn 20 năm, Shi và Day [3] đã công bố kết quả nghiên cứu chế tạo cao phân tử khoáng từ tro bay của hai nhà máy nhiệt điện ở Canada và Hoa Kỳ, và xi luyện kim của nhà máy luyện kim ở Canada. Các chất kích hoạt kiềm là NaOH và Na_2SiO_3 . Các tác giả đã chứng minh rằng, độ bền nén của vật liệu đạt giá trị cao nhất 50 MPa khi nồng độ NaOH là 10M.

Trong bài [4], Puertas và các cộng sự đã trình bày các kết quả nghiên cứu độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi luyện kim với những tỷ lệ tro bay/xi khác nhau trong những quy trình công nghệ có những tham số khác nhau. Cả tro bay lẫn xi luyện kim đều do các nhà máy ở Tây Ban Nha cung cấp. Chất kích hoạt kiềm được sử dụng là NaOH có nồng độ 2M và 10M. Các mẫu được sấy ở 25°C và 65°C trong 1 ngày, 7 ngày, 28 ngày và 90 ngày. Các tác giả đã chứng minh rằng vật liệu cao phân tử khoáng đạt giá trị 50 MPa khi được chế tạo với tỷ lệ 50% tro bay, 50% xi luyện kim, với nồng độ NaOH có giá trị 10M và được sấy ở 25°C trong 28 ngày. Độ bền nén tăng lên 65 MPa khi chỉ có

xi luyện kim, vật liệu được sấy ở 25°C hoặc 65°C trong 90 ngày.

Tác động của nồng độ Na₂O và các tỷ số SiO₂/Na₂O, tro bay/xi lên độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi luyện kim đã được Garcia và các cộng sự nghiên cứu [5]. Cả tro bay lẫn xi luyện kim đều do các nhà máy ở Mexico cung cấp. Chất kích hoạt kiềm là NaOH. Các tác giả đã chế tạo thành công vật liệu cao phân tử khoáng đạt độ bền nén cao nhất 85 MPa khi sử dụng 4% Na₂O, tỷ số SiO₂/Na₂O bằng 1 và 100% xi luyện kim.

Ảnh hưởng của xi luyện kim khi bổ sung thêm xi luyện kim vào tro bay đến độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay đã được Li và Liu nghiên cứu [6]. Các nguyên liệu đã được các tác giả sử dụng là tro bay loại F, metakaoline, xi luyện kim và thủy tinh lỏng. Thủy tinh lỏng có thành phần chất rắn gồm 28% SiO₂, 8,7% Na₂O, còn lại là nước. Cả tro bay lẫn xi luyện kim đều do các nhà máy của Trung Quốc cung cấp. Các tác giả đã thu được các kết quả sau đây: khi tỷ lệ xi luyện kim là 4% so với tro bay thì độ bền nén đạt giá trị cao nhất 70 MPa.

Ảnh hưởng của xi luyện kim khi bổ sung thêm xi luyện kim vào tro bay đến độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay cũng đã được Kumar và các cộng sự nghiên cứu [7]. Cả tro bay lẫn xi lò cao đều do các nhà máy ở Ấn Độ cung cấp. Chất kích hoạt kiềm là NaOH, nhiệt độ sấy là 27°C. Các tác giả đã thu được kết quả sau đây: khi tăng tỷ lệ xi luyện kim lên 50% so với tro bay thì độ bền nén đạt giá trị cao nhất 45 MPa.

Tác động của việc bị nung ở nhiệt độ cao đến độ bền của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi luyện kim đã được Guerrieri và Sanjayan nghiên cứu [8]. Chất kích hoạt kiềm là hỗn hợp của dung dịch Na₂SiO₃ với thành phần hóa học 29,4% SiO₂, 14,7% Na₂O, 55,9% H₂O và dung dịch NaOH với nồng độ 8M. Sau khi sấy ở 27°C thì đem ra đo độ bền nén, giá trị đo được khi đó được gọi là độ bền nén ban đầu. Đem các mẫu đi nung với nhiệt độ 800°C trong 1 giờ rồi để cho nguội lại đến nhiệt độ phòng mới đem ra đo độ bền nén. Giá trị đo được khi đó là độ bền nóng tồn dư. Độ bền nén ban đầu cao nhất có giá trị 80 MPa. Độ bền nén tồn dư có giá trị cao nhất 20 MPa.

Sự phụ thuộc của các tính chất của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi luyện kim vào tỷ lệ giữa tro bay và xi cũng như vào phương pháp sấy đã được Koh và các cộng sự nghiên cứu [9]. Tro bay và xi luyện kim được các tác giả sử dụng có nguồn gốc từ các nhà máy của Hàn Quốc. Chất kích hoạt kiềm là một hỗn hợp của Na₂SiO₃ và NaOH. Với tỷ lệ tro bay và xi là 50/50 và với nhiệt độ sấy là 20°C, vật liệu cao phân tử khoáng có độ bền nén cao nhất 70 MPa. Cũng với tỷ lệ tro bay và xi là 50/50 nhưng với nhiệt độ sấy là 60°C thì vật liệu cao phân tử khoáng có độ bền nén cao nhất 75 MPa.

Tính chất cơ học và cấu trúc của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi luyện kim đã được Yang và các cộng sự nghiên cứu [10]. Nguồn cung cấp tro bay và xi luyện kim là 2 nhà máy ở Trung Quốc. Các chất kích hoạt kiềm được sử dụng là Na₂SiO₃ với tỷ số SiO₂/Na₂O bằng 2,44 và NaOH. Từ hai chất kích hoạt kiềm đó, các tác giả đã chế tạo hỗn hợp kích hoạt kiềm với ba

giá trị của tỷ số SiO₂/Na₂O bằng 1,2, 1,4 và 2,0. Nhiệt độ sấy bằng 50°C. Thời gian sấy là 3 ngày, 7 ngày và 28 ngày. Mẫu vật liệu có tỷ lệ xi/tro bay bằng 80/20, tỷ lệ SiO₂/Na₂O bằng 1,4 và thời gian sấy 3 ngày có độ bền nén cao nhất 156 MPa.

Độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi luyện kim được sấy trong các điều kiện khác nhau ở nhiệt độ bình thường đã được Giasuddin và các cộng sự nghiên cứu [11]. Hai dung dịch kiềm được sử dụng là Na₂SiO₃ với thành phần 14,7% Na₂O, 29,4 SiO₂, còn lại là nước, và NaOH. Các tác giả đã sấy các mẫu theo 3 cách: sấy bọc kín, sấy ngâm trong nước và sấy ngâm trong nước mặn chứa 15% muối. Thời gian sấy là 28 ngày. Mẫu vật liệu được sấy bọc kín đạt được độ bền nén cao nhất 90 MPa.

Ảnh hưởng của hai loại xi luyện kim lên độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi đã được Nath và Kumar nghiên cứu [12]. Hai loại xi là xi dạng hạt từ lò cao và xi dạng hạt từ lò luyện thép. Cả hai loại xi có thành phần hóa học và cấu trúc tinh thể tương tự nhau. Cả tro bay và xi đều do các nhà máy của Ấn Độ cung cấp. Các mẫu được chế tạo từ các hỗn hợp khác nhau của hai loại xi và được sấy ở nhiệt độ bình thường trong 7 ngày và 28 ngày. Độ bền nén của các mẫu vật liệu sử dụng các loại xi khác nhau đều gần bằng nhau và phụ thuộc tỷ lệ giữa tro bay và xi. Mẫu đạt độ bền nén cao nhất 80 MPa là mẫu được sấy 28 ngày.

Độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi đã được Deb và các cộng sự nghiên cứu [13]. Dung dịch kích hoạt kiềm là một tổ hợp của Na₂SiO₃ và NaOH. Cốt liệu tinh là cát sông, còn cốt liệu thô là đá granit đã được nghiền vụn. Các mẫu được sấy ở nhiệt độ phòng sau 7 ngày, 28 ngày, 56 ngày và 90 ngày. Mẫu được sấy 90 ngày đạt độ bền nén cao nhất 54,3 MPa.

Trong bài [14], Deb và các cộng sự đã trình bày các kết quả nghiên cứu mới về tác động của việc gắn kết tro bay với xi lò cao và của hàm lượng chất kích hoạt kiềm đến độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng được sấy ở nhiệt độ phòng trong 7 ngày, 28 ngày, 56 ngày, 90 ngày và 180 ngày. Mẫu có độ bền nén cao nhất 70 MPa là mẫu có tỷ số trọng lượng Na₂SiO₃/NaOH bằng 1,5 sử dụng 20% xi luyện kim và 80% tro bay, được sấy trong 180 ngày.

Độ bền nén của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro bay và xi luyện kim được sấy ở nhiệt độ bình thường đã được Gao và các cộng sự nghiên cứu [15]. Cả tro bay lẫn xi đều do các nhà máy ở Hà Lan cung cấp. Chất kích hoạt kiềm là một hỗn hợp của Na₂SiO₃ với hàm lượng 27,69% SiO₂, 89% Na₂O, còn lại là nước, và NaOH. Trong tất cả các mẫu, tỷ số khối lượng giữa Na₂O và khối lượng tổng cộng của xi và tro bay là 5,6%. Tỷ số SiO₂/Na₂O có 5 giá trị khác nhau 1,8, 1,6, 1,4, 1,2 và 1,0. Mẫu chứa 10% tro bay và 10% xi luyện kim, có tỷ số SiO₂/Na₂O bằng 1,8, được sấy ở nhiệt độ phòng đạt được độ bền nén cao nhất 82 MPa sau khi sấy 7 ngày và 109 MPa sau khi sấy 28 ngày.

Trong bài [16], Liu và các cộng sự đã trình bày các kết quả nghiên cứu về vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở tro của lò đốt rác thải sinh hoạt (IFA) và xi lò cao đã được nghiền thành hạt

(GGBS). IFA được thu gom từ nhà máy đốt rác phát điện ở Keppel Seghers Tuas, nhà máy đốt rác phát điện thứ 5 của Singapore có năng lực xử lý 800 tấn rác/ngày và phát điện với công suất 22 MW. Kết quả nghiên cứu chứng tỏ rằng, vật liệu cao phân tử khoáng được chế tạo từ IFA có độ bền nén rất thấp, vào khoảng 5 MPa, cho nên cần bổ sung thêm GGBS. Vật liệu cao phân tử khoáng được chế tạo từ GGBS có độ bền nén khá cao là 39 MPa. Để đánh giá sự giải thoát các kim loại nặng từ IFA, các tác giả đã khảo sát sự ngấm chiết các kim loại nặng từ IFA và nhận thấy rằng, nồng độ các kim loại nặng tiết ra từ IFA cao hơn nhiều so với giới hạn được quy định trong tiêu chuẩn của Liên minh châu Âu về các chất thải được phép chôn lấp. Do đó không được phép chôn lấp IFA mà bắt buộc phải chế tạo vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở cả IFA và GGBS.

Sau đó các tác giả đã khảo sát sự ngấm chiết tích tụ các kim loại nặng trong 64 ngày của vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở cả IFA lẫn GGBS và đối chiếu với giới hạn được quy định trong Quyết định về chất lượng đất (Decree on Soil Quality - DSQ) của Hà Lan. Các số liệu thu được khi khảo sát sự ngấm chiết tích tụ các kim loại nặng trong 64 ngày cho thấy, nồng độ các kim loại nặng ngấm chiết từ vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở cả IFA lẫn GGBS tăng lên khi thành phần của IFA tăng lên, song ngay cả khi thành phần IFA gấp đôi thành phần GGBS thì nồng độ các kim loại nặng được ngấm chiết ra vẫn nhỏ hơn nồng độ được quy định trong DSQ.

Nói tóm lại, sau khi đốt rác phát điện phải tiến hành sản xuất vật liệu cao phân tử khoáng trên cơ sở cả IFA lẫn GGBS với thành phần IFA không cao hơn thành phần GGBS nhiều lần. Vật liệu cao phân tử khoáng đó hoàn toàn có thể được sử dụng làm vật liệu xây dựng với độ bền nén thích hợp.

Kết luận và thảo luận

Những thành tựu nghiên cứu vật liệu cao phân tử khoáng trên thế giới rất cần được giới khoa học và công nghệ vật liệu nước ta tham khảo, ứng dụng và phát triển để giải quyết hiện trạng ô nhiễm môi trường gây ra bởi tro bay của các nhà máy nhiệt điện đốt than và rác thải đô thị trong các thành phố lớn.

Xét đề nghị của Bộ trưởng Bộ Xây dựng, ngày 12/4/2017, Phó Thủ tướng Trịnh Đình Dũng đã ký Quyết định số 452/QĐ-TTg phê duyệt Đề án đẩy mạnh xử lý, sử dụng tro, xỉ, thạch cao của các nhà máy nhiệt điện, nhà máy hóa chất, phân bón làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng và trong các công trình xây dựng.

Khởi đầu việc tổ chức thực hiện Quyết định 452/QĐ-TTg nêu trên, ngày 3/10/2017 Bộ Xây dựng và Bộ Công thương đã tổ chức tại thành phố Cần Thơ một cuộc hội thảo khoa học. Tại cuộc hội thảo này, ông Phạm Văn Bắc, Vụ trưởng Vụ Vật liệu xây dựng (Bộ Xây dựng) cho biết: nếu các nhà máy nhiệt điện được đầu tư theo quy hoạch và lượng tro, xỉ thải ra không được xử lý thì đến năm 2020 sẽ có 109 triệu tấn.

Với lượng tro, xỉ do các nhà máy nhiệt điện đốt than thải ra môi trường, việc phát triển công nghệ vật liệu cao phân tử khoáng để tái chế lượng tro, xỉ đó thành vật liệu cao phân tử khoáng là một

nhệm vụ cấp bách của ngành khoa học và vật liệu nước ta.

Trong khoảng thời gian từ nay tới 2021, nhiều nhà máy đốt rác phát điện cũng sẽ bắt đầu được vận hành tại Hà Nội, thành phố Hồ Chí Minh, Đà Nẵng và một số thành phố lớn ở nước ta. Việc tổ chức tái chế tro đốt rác của các nhà máy đốt rác phát điện đó thành vật liệu cao phân tử khoáng cũng rất cần thiết được chuẩn bị ngay từ bây giờ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Hiệu và Nguyễn Bích Hà (2018), "Tổng quan tình hình nghiên cứu và ứng dụng geopolimer trên thế giới", *Báo cáo tổng kết Nhiệm vụ khoa học năm 2018*, Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
- [2] J.G.S. van Jaarveld, J.S.J. van Deventer and L. Lorenzen (1997), "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers", *Mineral Engineering*, **10**, p.659.
- [3] C. Shi and R.L. Day (1999), "Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends", *Advances in Cement Research*, **11**, pp.189-196.
- [4] F. Puertas, et al. (2000), "Alkali-activated fly ash/slag cement strength behaviour and hydration products", *Cement and Concrete Research*, **30**, pp.1625-1632.
- [5] J.I. Escalante García, et al. (2006), "Cementitious composites of pulverised fuel ash and blast furnace slag activated by sodium silicate: effect of Na₂O concentration and modulus", *Advances in Applied Ceramics*, **105**, pp.201-208.
- [6] Z. Li and S. Liu (2007), "Influence of slag as additive on compressive strength of fly ash-based geopolimer", *J. Mater. Civ. Eng.*, **19**, pp.470-474.
- [7] S. Kumar, et al. (2010), "Influence of granulated blast furnace slag on the reaction structure and properties of fly ash based geopolimer", *J. Mater. Sci.*, **45**, pp.607-615.
- [8] M. Guerrieri and J.G. Sanjayan (2010), "Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures", *Fire Mater.*, **34**, pp.163-175.
- [9] K. Koh, et al. (2011), "Effect of the combined using of fly ash and granulated blast furnace slag on properties of cementless alkali-activated mortar", *Advanced Materials Research*, **287-290**, pp.916-921.
- [10] T. Yang, et al. (2012), "Mechanical property and structure of alkali-activated fly ash and slag blends", *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **1**, pp.167-178.
- [11] H.M. Giasuddin, et al. (2013), "Strength of geopolimer cured in saline water in ambient conditions", *Fuel*, **107**, pp.34-39.
- [12] S.K. Nath and S. Kumar (2013), "Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolimer", *Construction and Building Materials*, **38**, pp.924-930.
- [13] P.S. Deb, et al. (2013), "Strength and permeation properties of slag blended fly ash based geopolimer concrete", *Advanced Materials Research*, **651**, pp.168-173.
- [14] P.S. Deb, et al. (2014), "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolimer concrete cured at ambient temperature", *Materials and Design*, **62**, pp.32-39.
- [15] X. Gao, et al. (2015), "Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag-fly ash blends", *Construction and Building Materials*, **80**, pp.105-115.
- [16] Y. Liu, et al. (2016), "Alkali-activated ground granulated blast-furnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder", *Construction and Building Materials*, **112**, pp.1005-1012.