

# NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ CHẾ TẠO BÊ TÔNG GEOPOLYMER ỨNG DỤNG TRÊN CƠ SỞ TRO BAY NHIỆT ĐIỆN VĨNH TÂN CHO CÔNG TRÌNH KÈ ĐÊ BIỂN

Hồ Ngọc Hùng<sup>1</sup>, Nguyễn Thu Thủy<sup>1\*</sup>, Nguyễn Văn Trọng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

\*Email: thuthuyqn88@gmail.com

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo bê tông geopolymer sử dụng tro bay của Nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân (Bình Thuận) nhằm định hướng ứng dụng cho các công trình đê kè biển. Tro bay ban đầu có hàm lượng carbon chưa cháy hết cao ( $LOI = 10,89\%$ ), gây ảnh hưởng bất lợi đến quá trình geopolymer hóa và tính chất cơ lý của vật liệu. Để khắc phục vấn đề này, tro bay được xử lý bằng phương pháp tuyển nổi kết hợp phân cấp hạt nhằm loại bỏ carbon tồn dư và nâng cao hoạt tính aluminosilicate. Kết quả cho thấy hàm lượng carbon sau xử lý giảm xuống còn  $0,66\%$ , đáp ứng yêu cầu sử dụng làm tiền chất geopolymer. Bê tông geopolymer được chế tạo trên cơ sở tro bay đã xử lý, kết hợp xỉ lò cao nghiền mịn và dung dịch kích hoạt kiềm. Kết quả thực nghiệm cho thấy cấp phối tối ưu đạt cường độ nén  $57,11 \text{ MPa}$  ở tuổi 28 ngày, cường độ uốn  $14,49 \text{ MPa}$ , lực kéo nhỏ cốt thép đạt  $78 \text{ 780 N}$  và khả năng chống thấm đạt trên cấp B30. Ngoài ra, vật liệu còn thể hiện khả năng kháng xâm thực tốt trong môi trường axit và sunfat nhờ cấu trúc geopolymer đặc chắc. Kết quả nghiên cứu cho thấy bê tông geopolymer sử dụng tro bay Vĩnh Tân có tiềm năng ứng dụng trong các cấu kiện bê tông phục vụ công trình đê kè biển theo hướng tận dụng chất thải công nghiệp và giảm phát thải khí nhà kính.

**Từ khóa:** Bê tông geopolymer; tro bay Vĩnh Tân; tuyển nổi carbon; xỉ lò cao; công trình đê kè biển.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại Việt Nam, sự phát triển nhanh chóng của các nhà máy nhiệt điện đốt than góp phần quan trọng bảo đảm an ninh năng lượng quốc gia, nhưng cũng làm phát sinh khối lượng lớn tro bay và xỉ than. Trên thế giới, việc quản lý và tiêu thụ nguồn phế thải vĩ mô này từ lâu đã là thách thức lớn đối với ngành năng lượng và môi trường [1]. Hiện nay, nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân (Bình Thuận) đang là một trong những điểm nóng về tích tụ tro xỉ, gây áp lực nặng nề lên quỹ đất lưu chứa và đặt ra yêu cầu cấp bách về việc chế tạo các hệ vật liệu xanh dựa trên nền tảng chất kết dính công nghiệp tái chế [2]. Do đó, nghiên cứu thu hồi và nâng cao chuỗi giá trị của nguồn tro xỉ này làm nguyên liệu xây dựng là giải pháp tất yếu, hoàn toàn phù hợp với xu thế phát triển bền vững và mô hình kinh tế tuần hoàn toàn cầu [3].

Song song với bài toán xử lý chất thải, nhu cầu xây dựng và kiên cố hóa hạ tầng ven biển như hệ thống kè đê biển, bến cảng tại Việt Nam hiện nay là rất lớn. Các công trình này thường xuyên phải tiếp xúc trực tiếp với môi trường biển xâm thực mạnh, nơi có nồng độ ion sunfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) và chloride ( $\text{Cl}^-$ ) cao [4]. Các tác nhân này phá hủy cấu trúc đá xi măng và ăn mòn cốt thép, dẫn đến suy giảm nhanh chóng độ bền lâu của bê tông sử dụng xi măng Portland truyền thống [5], [6]. Mặc dù việc ứng dụng xi măng bền sunfat có thể hạn chế một phần tổn thất do ăn mòn hóa học, nhưng quá trình sản xuất clinker của loại xi măng này vẫn tiêu thụ nguồn năng lượng hóa thạch lớn và phát thải lượng đáng kể khí nhà kính  $\text{CO}_2$  [7].

Trong những năm gần đây, công nghệ vật liệu geopolymer (chất kết dính hoạt hóa kiềm) nổi lên như một giải pháp đột phá, có khả năng

thay thế hoàn toàn xi măng truyền thống nhằm giảm thiểu "dấu chân carbon" [8], [9]. Chất kết dính vô cơ này được hình thành từ phản ứng đa trùng ngưng các pha alumino-silicate hoạt tính trong môi trường kiềm mạnh, tạo nên cấu trúc không gian ba chiều bền vững [10]. Nhiều công bố cho thấy việc kết hợp tro bay với xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS) giúp tối ưu hóa đáng kể tính chất cơ lý và độ bền của bê tông geopolimer ngay trong điều kiện bảo dưỡng tự nhiên [11], [12]. Ở hệ geopolimer sử dụng tro bay đơn thuần, sản phẩm phản ứng cốt lõi là hệ gel vô định hình N-A-S-H (sodium alumino-silicate hydrate) [13]. Khi bổ sung thêm GGBS, sự hòa tan của ion  $\text{Ca}^{2+}$  từ xỉ lò cao kích thích sự hình thành đồng thời pha gel C-A-S-H (calcium alumino-silicate hydrate) [14]. Sự đồng tồn tại và lồng ghép bổ trợ lẫn nhau của hai pha gel này (N-A-S-H và C-A-S-H) được đánh giá là nguyên nhân then chốt cấu thành nên cấu trúc nền đặc chắc, tăng cường khả năng kháng thấm và kháng xâm thực vượt trội so với hệ geopolimer tro bay truyền thống [15], [16].

Trong thực tế, khả năng kháng môi trường biển của bê tông geopolimer vượt trội hơn vật liệu truyền thống nhờ cấu trúc vi mô đặc chắc của ma trận gel, đóng vai trò như màng ngăn hạn chế sự khuếch tán của ion chloride ( $\text{Cl}^-$ ) và sunfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), giúp bảo vệ cốt thép chống ăn mòn hiệu quả. Nhiều công trình quốc tế dài hạn tại Úc và châu Âu đã chứng minh bê tông geopolimer duy trì tốt cường độ và độ bền khi ngâm giữ liên tục trong nước biển. Tuy nhiên, rào cản lớn hiện nay là các nghiên cứu đa số đều sử dụng nguồn tro bay đạt chuẩn thương mại (LOI thấp) và bắt buộc phải bảo dưỡng nhiệt ở nhiệt độ cao ( $60^\circ\text{C}$  -  $80^\circ\text{C}$ ) để kích hoạt cường độ sớm. Quy trình này hoàn toàn bất khả thi khi áp dụng cho các cấu kiện đúc sẵn khối lớn hoặc thi công trực tiếp ngoài thực địa bờ biển Việt Nam. Do đó, việc nghiên cứu chế tạo bê tông geopolimer tự đóng rắn trong điều kiện tự nhiên từ nguồn phế thải đặc thù tại chỗ là một yêu cầu cấp thiết.

Tuy nhiên, việc trực tiếp ứng dụng nguồn tro bay Nhiệt điện Vĩnh Tân vào mục đích trên vẫn vấp phải một trở ngại kỹ thuật cốt lõi: hàm lượng carbon chưa cháy hết tồn dư quá cao, thể hiện

qua chỉ số mất khi nung rất lớn ( $\text{LOI} = 10,89\%$ ). Lượng carbon chưa cháy này hoạt động như một chất hấp phụ mạnh, làm tiêu hao đáng kể lượng dung dịch kích hoạt kiềm, cản trở động học của phản ứng đa trùng ngưng và gây suy giảm nghiêm trọng cường độ, độ bền của vật liệu đóng rắn. Thêm vào đó, đặc tính phân bố kích thước hạt không đồng đều của nguồn phụ phẩm này cũng ảnh hưởng bất lợi đến độ đồng nhất của hỗn hợp bê tông. Cho đến nay, các công trình nghiên cứu trong nước đa số tập trung vào nguồn tro bay cơ lý chuẩn ( $\text{LOI} < 6\%$ ) hoặc chủ yếu mới dừng lại ở quy mô khảo sát phòng thí nghiệm mang tính mô tả hiện tượng. Các nghiên cứu đồng bộ về giải pháp xử lý sâu, tối ưu hóa cấp phối bê tông geopolimer từ nguồn tro bay đặc thù có LOI cao để chế tạo các cấu kiện khối tự chèn đúc sẵn tính năng cao ứng dụng thực tế quy mô lớn tại các công trình biển đảo vẫn còn rất hạn chế. Xuất phát từ thực trạng đó, nghiên cứu tập trung vào giải pháp công nghệ xử lý kép: tuyển nổi sâu kết hợp phân cấp kích thước hạt nhằm loại bỏ triệt để lượng carbon tồn dư trong tro bay Vĩnh Tân, hạ chỉ số LOI xuống mức an toàn ( $0,66\%$ ), tạo ra tiền chất sạch cho phản ứng geopolimer hóa. Trên cơ sở nguồn nguyên liệu sau xử lý, nghiên cứu tiến hành thiết kế cấp phối bê tông geopolimer cường độ cao và thử nghiệm chế tạo cấu kiện khối tự chèn bảo vệ đê biển ở quy mô pilot. Đồng thời, bài báo tập trung phân tích sâu ảnh hưởng của hàm lượng dung dịch hoạt hóa kiềm đến tính chất cơ lý, cấu trúc, khả năng chống thấm [17], độ bền kháng axit [18] và kháng sương giá của vật liệu, nhằm hoàn thiện cơ sở lý thuyết và thực tiễn cho việc thương mại hóa cấu kiện xanh bảo vệ bờ biển Việt Nam [19].

## 2. Thành phần vật chất và phương pháp xử lý tro bay

### 2.1. Thành phần vật chất mẫu tro xỉ đầu vào

Mẫu tro xỉ ban đầu được thu thập từ Nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân (khối lượng 500 kg), gia công và chuẩn bị tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Kết quả phân tích thành phần hóa học được thể hiện trong Bảng 1.

Kết quả Bảng 1 cho thấy tổng hàm lượng oxit hoạt tính ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) đạt

69,83%, thể hiện tiềm năng lớn cho phản ứng geopolymer hóa [9]. Tuy nhiên, hàm lượng carbon chưa cháy hết (LOI = 10,89%) vượt mức khuyến nghị đối với vật liệu kết dính [12]. Lượng carbon tồn dư cao này làm tăng khả năng hấp phụ dung dịch kiềm, ảnh hưởng bất lợi đến tính công tác và quá trình hoạt hóa geopolymer [13],

đặt ra yêu cầu phải xử lý làm sạch tiền chất.

Kết quả nhiễu xạ tia X (XRD) tại Bảng 2 chỉ ra pha vô định hình chiếm tỷ lệ lớn, đóng vai trò then chốt giải phóng các ion  $\text{Si}^{4+}$  và  $\text{Al}^{3+}$  trong môi trường kiềm mạnh. Các pha tinh thể như Quartz và Mullite đóng vai trò là pha độn trong cấu trúc vật liệu.

**Bảng 1. Thành phần hóa học của mẫu tro xỉ Vĩnh Tân ban đầu**

| Thành phần    | C     | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | CaO  | $\text{Na}_2\text{O}$ |
|---------------|-------|----------------|-------------------------|-------------------------|------|-----------------------|
| Hàm lượng (%) | 10,89 | 44,15          | 21,33                   | 4,35                    | 0,59 | 0,14                  |

**Bảng 2. Thành phần khoáng vật của mẫu tro xỉ Vĩnh Tân**

| Thành phần khoáng vật                        | Khoảng hàm lượng ( ~ % ) |
|----------------------------------------------|--------------------------|
| Vô định hình                                 | Nhiều                    |
| Mullite – $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ | 5 - 7                    |
| Thạch anh – $\text{SiO}_2$                   | 6 - 8                    |

Phân tích thành phần độ hạt (Bảng 3) cho thấy carbon không phân bố đều mà tập trung chủ yếu ở các cấp hạt trung bình (-0,2+0,035 mm) với hàm lượng lên tới 22 – 24%. Ngược lại, cấp hạt mịn nhất (-0,035 mm) chiếm tỷ trọng lớn

nhất (trên 60%) nhưng có hàm lượng carbon thấp nhất (3,60%). Đặc điểm này là cơ sở khoa học để áp dụng phương pháp phân cấp hạt kết hợp tuyển nổi nhằm tách loại carbon hiệu quả, nâng cao hoạt tính của tiền chất geopolymer.

**Bảng 3. Phân bố thành phần độ hạt và hàm lượng carbon tồn dư**

| Cấp hạt (mm) | Thu hoạch     |          | Hàm lượng C, % |          | Phân bố       |          |
|--------------|---------------|----------|----------------|----------|---------------|----------|
|              | Bộ phận       | Lũy tích | Bộ phận        | Lũy tích | Bộ phận       | Lũy tích |
| + 0,2        | 2,65          | 2,65     | 6,46           | 6,46     | 1,57          | 1,57     |
| -0,2+0,125   | 1,58          | 4,23     | 23,39          | 12,80    | 3,40          | 4,97     |
| -0,125+0,074 | 9,11          | 13,34    | 22,06          | 19,12    | 18,44         | 23,41    |
| -0,074+0,035 | 25,84         | 39,18    | 23,82          | 22,22    | 56,49         | 79,90    |
| - 0,035      | 60,82         | 100,00   | 3,60           | 10,89    | 20,10         | 100,00   |
| <b>Tổng</b>  | <b>100,00</b> |          | <b>10,89</b>   |          | <b>100,00</b> |          |

## 2.2. Phương pháp xử lý tro bay

Để tối ưu hóa chất lượng tiền chất geopolymer, mẫu tro xỉ được xử lý qua quy trình hai giai đoạn: phân cấp kích thước hạt và tuyển nổi tách loại carbon.

Đầu tiên, mẫu được sàng loại bỏ các hạt xỉ thô kích thước > 0,2 mm (hoạt tính kém, hàm lượng carbon không ổn định). Phần dưới sàng (< 0,2 mm) được đưa vào máy tuyển nổi Denver để loại bỏ carbon chưa cháy. Chế độ thuốc tuyển tối ưu để phân tách carbon và pha khoáng aluminosilicate bao gồm: natri silicat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) làm chất

đề chìm khoáng aluminosilicate với liều lượng 1000 g/t; dầu hỏa/diezen làm thuốc tập hợp carbon với liều lượng 1200 g/t; và dầu thông làm thuốc tạo bọt với liều lượng 200 g/t [19].

Sau khi tuyển nổi, sản phẩm ngăn máy thu được là tro bay sạch có hàm lượng carbon giảm mạnh từ 10,89% xuống còn 0,66% (Bảng 4), đạt độ sạch để làm tiền chất cho quá trình geopolymer hóa, trong khi phần bọt chứa than được tách riêng với thực thu carbon đạt 93,51%.

**Bảng 4. Kết quả cân bằng sản phẩm sau quá trình tuyển nổi**

| Sản phẩm                         | Thu hoạch (%) | Hàm lượng C (%) | Thực thu C (%) |
|----------------------------------|---------------|-----------------|----------------|
| Xỉ +0,2mm                        | 2,65          | 6,46            | 1,57           |
| Sản phẩm bột (than)              | 16,30         | 62,46           | 93,51          |
| Sản phẩm ngấn máy (tro bay sạch) | 81,05         | 0,66            | 4,91           |
| <i>Quặng đầu</i>                 | <i>100,00</i> | <i>10,89</i>    | <i>100,00</i>  |

### 3. Chế tạo bê tông geopolimer

#### 3.1. Nguyên vật liệu

- Tro bay sạch: Sử dụng tro bay Vĩnh Tân sau tuyển nổi tách carbon (LOI = 0,66%), giàu các pha alumino-silicate hoạt tính, đóng vai trò là tiền chất cốt lõi cho phản ứng geopolimer hóa.

- Xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS): Bổ sung với hàm lượng 15% khối lượng chất kết dính để cung cấp oxit CaO. Sự có mặt của GGBS thúc đẩy quá trình đông rắn ở nhiệt độ thường, cải thiện cấu

trúc vi mô và tốc độ phát triển cường độ.

- Dung dịch kích hoạt kiềm: Hỗn hợp natri silicat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) và kali hydroxit (KOH). Tỷ lệ mol  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  được điều chỉnh trong khoảng 1,2-1,4 nhằm tối ưu hóa sự hòa tan các pha alumino-silicate và phản ứng đa trùng ngưng.

- Cốt liệu: Gồm cát vàng sạch và đá dăm kích thước hạt 7-20 mm, được phối trộn theo thành phần cấp phối liên tục để bảo đảm độ đặc chắc và khả năng chịu lực cho bê tông.



Tro bay



KOH



Cát vàng



Đá

**Hình 1. Nguyên vật liệu sử dụng để chế tạo bê tông geopolimer**

#### 3.2. Thiết kế cấp phối và chế tạo mẫu thử

Thành phần cấp phối cho  $1\text{m}^3$  bê tông geopolimer được thiết kế dựa trên nguyên lý tối ưu hóa độ đặc chắc của hệ cốt liệu và khảo sát ảnh hưởng của lượng chất hoạt hóa kiềm. Tỷ lệ khối lượng các nguyên liệu được quy đổi trực tiếp theo tổng lượng chất kết dính cố định (tro bay sạch + GGBS = 541 kg, tương ứng hệ số 1,00).

Các thành phần cố định bao gồm:

- Đá dăm (Cốt liệu lớn):  $902\text{ kg/m}^3$ , tương đương tỷ lệ 1,67.

- Cát vàng (Cốt liệu mịn):  $700\text{ kg/m}^3$ , tương đương tỷ lệ 1,29.

- Tro bay sạch (Tiền chất 1):  $488\text{ kg/m}^3$ , tương đương tỷ lệ 0,90.

- GGBS (Tiền chất 2):  $53\text{ kg/m}^3$ , tương

đương tỷ lệ 0,10.

Hàm lượng dung dịch kích hoạt hóa thay đổi giảm dần theo 4 mức cấp phối:

- Mẫu M1:  $226\text{ kg/m}^3$ , tương đương tỷ lệ 0,42.

- Mẫu M2:  $170\text{ kg/m}^3$ , tương đương tỷ lệ 0,31.

- Mẫu M3:  $142\text{ kg/m}^3$ , tương đương tỷ lệ 0,26.

- Mẫu M4:  $113\text{ kg/m}^3$ , tương đương tỷ lệ 0,21.

Quy trình chế tạo mẫu được thực hiện tại phòng thí nghiệm (Hình 2). Ban đầu, hỗn hợp khô gồm tro bay, GGBS và cốt liệu được trộn khô trong 5 phút. Sau đó, cho dung dịch kích hoạt kiềm vào và tiếp tục trộn 6 phút để đạt độ đồng nhất.

Để đảm bảo tính đồng nhất về tỷ lệ cấp phối, khối lượng nguyên liệu nhào trộn thực tế cho mỗi mẻ thí nghiệm (gồm 3 mẫu thử) được quy

đổi chính xác theo thể tích hình học của từng loại khuôn đúc (Bảng 5).

Sau khi đổ khuôn, hỗn hợp được đầm chặt trên bàn rung tần số cao trong 60 giây để loại bỏ bọt khí. Quá trình dưỡng hộ nhiệt được thực hiện bằng cách đặt khuôn mẫu vào thiết bị

autoclave ở nhiệt độ 80°C trong thời gian 8 giờ nhằm thúc đẩy phản ứng đa trùng ngưng giai đoạn đầu. Sau đó, các mẫu được tháo khuôn và bảo dưỡng ẩm trong điều kiện phòng thí nghiệm đến ngày tuổi quy định để tiến hành kiểm tra các tính chất cơ lý theo tiêu chuẩn TCVN hiện hành.



Máy trộn bê tông geopolymer



Đổ mẫu sau khi trộn



Autoclave

**Hình 2. Thiết bị phối trộn và dưỡng hộ mẫu bê tông geopolymer**

**Bảng 5. Khối lượng nguyên liệu nhào trộn thực tế cho các mẻ mẫu thử**

| Loại mẫu thử           | Kích thước khuôn (mm)      | Cấp phối | Đá dăm (kg) | Cát vàng (kg) | Tro bay sạch (kg) | GGBS (kg) | Dung dịch kiềm (kg) |
|------------------------|----------------------------|----------|-------------|---------------|-------------------|-----------|---------------------|
| Cường độ nén & kéo nhỏ | Lập phương 150 x 150 x 150 | M1       | 2,869       | 2,228         | 1,553             | 0,169     | 0,763               |
|                        |                            | M2       |             |               |                   |           | 0,574               |
|                        |                            | M3       |             |               |                   |           | 0,479               |
|                        |                            | M4       |             |               |                   |           | 0,381               |
| Độ bền uốn             | Dầm 100 x 100 x 400        | M2       | 3,400       | 2,614         | 1,841             | 0,200     | 0,680               |
| Độ chống thấm nước     | Hình trụ tiêu chuẩn        | M2       | 2,240       | 1,745         | 1,217             | 0,123     | 0,450               |

Ghi chú: Đối với mẫu thử kéo nhỏ, thanh cốt thép đường kính 14 mm được định vị chính xác ở khuôn lập phương trước khi đổ hỗn hợp.

#### 4. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

##### 4.1. Ảnh hưởng của hàm lượng dung dịch hoạt hóa kiềm đến sự phát triển cường độ nén

Cường độ nén là chỉ tiêu cốt lõi để đánh giá mức độ hình thành cấu trúc geopolymer. Trong nghiên cứu này, các mẫu bê tông lập phương kích thước 150 x 150 x 150 mm được xác định cường độ nén tại các tuổi 3, 7, 28 và 40 ngày theo tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 (Bảng 6).

Số liệu tại Bảng 6 cho thấy hệ vật liệu có tốc

độ phát triển cường độ nén sớm rất nhanh. Tại tuổi 7 ngày, cường độ nén của tất cả các mẫu đạt từ 85–95% giá trị ở tuổi 28 ngày. Xu hướng này khẳng định phản ứng hoạt hóa kiềm và quá trình hình thành gel vô cơ diễn ra mãnh liệt trong giai đoạn đầu dưới tác động của nhiệt độ bảo dưỡng (80°C).

Kết quả phát triển cường độ nén cao ở giai đoạn sớm, đặc biệt của mẫu M2 giải thích cho cơ chế hình thành cấu trúc đặc chắc của đá geopolymer. Dưới tác dụng của chất hoạt hóa

kiềm mạnh, quá trình hòa tan các pha aluminosilicate vô định hình trong tro bay tuyển và xỉ lò cao diễn ra mãnh liệt, thúc đẩy sự hình thành đồng thời của hệ gel song song N-A-S-H (sodium aluminosilicate hydrate) và C-A-S-H (calcium aluminosilicate hydrate). Hai hệ gel này lồng ghép, đan xen bổ trợ nhau để lấp đầy các lỗ rỗng nội tại, tối ưu hóa cấu trúc vi mô và xây dựng ma trận liên kết bền vững cho bê tông.

Trong các cấp phối khảo sát, lượng dung dịch hoạt hóa kiềm đóng vai trò quyết định. Khi giảm lượng dung dịch kiềm xuống 142 kg/m<sup>3</sup> (M3) và 113 kg/m<sup>3</sup> (M4), cường độ nén giảm sâu do thiếu hụt chất kích hoạt, khiến phản ứng geopolymer hóa diễn ra không hoàn toàn. Ngược lại, mẫu M1 cho cường độ cao nhất nhờ lượng dung dịch kiềm lớn làm tăng tỷ lệ hòa tan các pha giàu Si và Al. Tuy nhiên, cấp phối M2 được đánh giá là lựa chọn tối ưu về mặt công nghệ và kinh tế. Mẫu M1 sử dụng lượng kiềm quá lớn dễ gây dư thừa kiềm tự do, vừa tăng giá thành vừa tiềm ẩn nguy cơ cấu trúc gel kém ổn định và bị cacbonat hóa trong dài hạn.

Để làm rõ giá trị khoa học của kết quả này, một phân tích đối chiếu với các công bố trong và ngoài nước đã được thực hiện. So với các nghiên cứu trong nước sử dụng tro bay nhiệt điện chưa qua xử lý sâu (thường chỉ cho cường độ nén dao động từ 30-40 MPa do lượng carbon chưa cháy LOI cao cản trở phản ứng), việc mẫu M2 đạt cường độ 57,11 MPa khẳng định tính đúng đắn và hiệu quả vượt trội của quy trình tuyển nổi kết hợp phân cấp hạt được đề xuất. Kết quả cường độ này cũng hoàn toàn tương đồng với nghiên cứu của Ryu và ctv. (2021) khi chế tạo bê tông geopolymer từ nguồn tro bay chuẩn Loại F đạt cường độ từ 50-55 MPa [17], và phù hợp với xu hướng tối ưu hóa hạt tiền chất chất lượng cao của Yao và ctv. (2015) [1]. Điều này chứng minh rằng, công nghệ xử lý trong nghiên cứu đã nâng cấp thành công nguồn tro bay khó sử dụng như Vĩnh Tân thành nguồn nguyên liệu đạt tiêu chuẩn chất lượng quốc tế, mở ra tiềm năng lớn cho bê tông kết cấu mác cao.

**Bảng 6. Cường độ nén của các nhóm cấp phối bê tông geopolymer**

| Mẫu | TP dd kiềm hoạt hóa (kg/m <sup>3</sup> ) | Cường độ nén (MPa) |        |         |         |
|-----|------------------------------------------|--------------------|--------|---------|---------|
|     |                                          | 3 ngày             | 7 ngày | 28 ngày | 40 ngày |
| M1  | 226                                      | 44,00              | 53,80  | 59,90   | -       |
| M2  | 170                                      | 37,80              | 48,90  | 57,11   | 57,00   |
| M3  | 142                                      | 33,00              | 39,70  | 45,80   | -       |
| M4  | 113                                      | 31,10              | 34,20  | 38,00   | -       |

## 4.2. Cường độ uốn và độ bám dính cốt thép

### 4.2.1. Cường độ uốn

Thử nghiệm cường độ kéo khi uốn được thực hiện trên các mẫu dầm kích thước 100 x 100 x 400 mm theo tiêu chuẩn TCVN 3119:2022. Kết quả thực nghiệm cho thấy cấp phối tối ưu M2 đạt cường độ kéo khi uốn 14,49 MPa tại tuổi 28 ngày.

Giá trị này cao hơn vượt trội so với bê tông xi măng Portland truyền thống có cùng cấp cường độ nén (vốn thường chỉ đạt khoảng 5,0-6,0 MPa [5]), chứng minh khả năng chịu uốn và kháng nứt vượt trội của hệ vật liệu geopolymer. Sự gia tăng này là hệ quả của mạng lưới liên kết không gian ba chiều đặc chắc tạo thành từ

phản ứng đa trùng ngưng. Cấu trúc gel vô cơ giúp phân bố đồng đều ứng suất nội tại và ngăn chặn hiệu quả sự phát triển của vi khe nứt dưới tác dụng của tải trọng uốn. Ngoài ra, sự xuất hiện của xỉ lò cao (GGBS) làm tăng mật độ hạt và tối ưu hóa độ đặc chắc của vùng chuyển tiếp giữa chất kết dính và cốt liệu.

### 4.2.2. Độ bám dính cốt thép

Khả năng liên kết giữa nền bê tông geopolymer và cốt thép chịu lực được đánh giá thông qua thử nghiệm kéo nhỏ trên các mẫu lập phương kích thước 150 x 150 x 150 mm (cấp phối M2), bố trí thanh thép vằn đường kính 14 mm với chiều dài neo 50 mm theo tiêu chuẩn TCVN 9345:2012.



**Hình 3. Sơ đồ mẫu thử kéo nhỏ xác định lực bám dính cốt thép**

Kết quả thí nghiệm kéo nhỏ ghi nhận lực kéo nhỏ trung bình đạt 78.780 N. Đáng chú ý, trong suốt quá trình thử nghiệm, không xảy ra hiện tượng tuột hay trượt bề mặt tiếp xúc giao diện giữa thanh thép và bê tông, cho thấy liên kết giữa ma trận geopolymer tối ưu M2 với cốt thép là cực kỳ bền vững. Khả năng bám dính vượt trội này đạt được là nhờ cấu trúc vi mô đặc chắc của hệ nền geopolymer tro bay - xỉ lò cao được tối ưu hóa độ điền đầy, kết hợp với lực ma sát và độ bám cơ học cao xung quanh bề mặt gân của thanh cốt thép. Kết quả này là minh chứng đanh thép khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tế của cấp phối M2 trong việc chế tạo các cấu kiện bê tông cốt thép chịu lực, đảm bảo khả năng truyền lực và làm việc đồng thời giữa hai loại vật liệu trong môi trường biển đảo.

#### 4.3. Khả năng chống thấm nước

Khả năng chống thấm nước của bê tông geopolymer được xác định trên các mẫu hình trụ (cấp phối M2) theo phương pháp gia tăng áp lực nước từng cấp theo tiêu chuẩn TCVN 3116:2022.

Kết quả thực nghiệm cho thấy mẫu bê tông geopolymer không xuất hiện hiện tượng ẩm hay thấm nước xuyên qua bề mặt ở cấp áp lực tối đa 1,2 MPa (tương đương 12 bar). Theo phân cấp chống thấm, vật liệu đạt mức chống thấm vượt mức B12, cao hơn đáng kể so với bê tông xi măng Portland thông thường có cùng cấp cường độ [5].

Độ kín nước cao của bê tông geopolymer cấu thành từ cấu trúc vi mô đặc chắc của vật liệu. Quá trình hoạt hóa kiềm thúc đẩy sự hình thành liên tục của hệ gel alumino-silicate, lấp

đầy và cắt đứt hệ thống lỗ rỗng mao quản trong nền ma trận [9]. Bên cạnh đó, việc kết hợp tro bay sau tuyển nổi (có kích thước hạt mịn, phân cấp đều) và xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS) tạo ra hiệu ứng chèn chặt tối ưu, phân tán đều vào các khe rỗng cấu trúc [15].



**Hình 4. Mẫu thử xác định khả năng chống thấm nước**

Hơn nữa, chế độ dưỡng hộ nhiệt ở 80°C đóng vai trò kích thích động học phản ứng geopolymer hóa giai đoạn đầu, làm tăng mật độ liên kết gel và hạn chế tối đa sự hình thành các đường mao quản liên thông nội tại [16]. Nhờ liên kết vô cơ bền vững này, khả năng thâm nhập của phân tử nước vào cấu trúc lòng vật liệu bị triệt tiêu, khẳng định khả năng làm việc ổn định của cấp phối M2 trong điều kiện ngập nước hoặc áp lực nước cao của môi trường biển xâm thực.

#### 4.4. Độ bền trong môi trường xâm thực hóa học và ở nhiệt độ cao

##### 4.4.1. Độ bền trong môi trường xâm thực hóa học

Độ bền hóa học của bê tông geopolymer được đánh giá thông qua thử nghiệm ngâm mẫu cấp phối tối ưu M2 trong các dung dịch sunfat và axit trong thời gian 24 tuần (Hình 5).



Ngâm mẫu M2 các môi trường thời gian 24 tuần

Bề mặt mẫu M2 sau khi ngâm

**Hình 5. Mẫu bê tông geopolymer ngâm trong môi trường xâm thực axit và sunfat**

Kết quả thực nghiệm cho thấy vật liệu có khả năng chống chịu vượt trội trong các môi trường xâm thực. Trong dung dịch sunfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  và  $\text{MgSO}_4$  nồng độ 2%), độ biến dạng chiều dài của mẫu rất nhỏ ( $< 0,016\%$ ), bề mặt mẫu nguyên vẹn và không xuất hiện dấu hiệu nứt vỡ cấu trúc. Đối với môi trường axit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  nồng độ 2%), mẫu bê tông vẫn duy trì hình dạng ổn định, mức độ suy giảm khối lượng và tổn hại bề mặt không đáng kể sau thời gian dài ngâm chiết.

Khả năng duy trì cấu trúc bền vững với mức biến động cường độ nén rất thấp (dưới 2%) sau chu kỳ ngâm hóa chất là một điểm sáng về tính năng kháng xâm thực của hệ vật liệu này. Trong tương quan đối chiếu, bê tông sử dụng xi măng Portland (OPC) truyền thống thường bị suy giảm từ 15–20% cường độ trong cùng điều kiện do các ion  $\text{SO}_4^{2-}$  tấn công vào khoáng portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) và canxi aluminat hydrat để tạo thành thạch cao, ettringite gây trương nở, nứt vỡ cấu trúc [4], [18].

Ngược lại, đá geopolymere tro bay - xỉ lò cao không chứa khoáng  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tự do. Bản chất bền vững này xuất phát từ ma trận cốt lõi là mạng lưới liên kết vô cơ ba chiều cấu thành từ các chuỗi vô định hình Si-O-Al có độ ổn định và

trở về mặt hóa học cao [18]. Cấu trúc liên kết này kết hợp với nền ma trận đặc chắc sau xử lý đóng vai trò như một màng chắn cơ học, ngăn chặn hiệu quả sự khuếch tán của các ion xâm thực ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  và  $\text{H}^+$ ) vào sâu bên trong lòng vật liệu [13]. Kết quả này hoàn toàn tương thích với các kết luận của Bakharev (2005) về độ bền của vật liệu hoạt hóa kiềm trước sự tấn công của axit và muối [18], khẳng định tính thích ứng cao của cấp phối M2 trong điều kiện môi trường biển đảo đặc thù tại Việt Nam.

#### 4.4.2. Khả năng chịu nhiệt

Khả năng chịu nhiệt của bê tông geopolymere được đánh giá trên các mẫu cấp phối M2 kích thước 100 x 100 x 100 mm thông qua quy trình nung ở các mức nhiệt độ 300°C, 600°C và 900°C trong thời gian 3 giờ.

Kết quả quan sát (Hình 6) cho thấy ở 300°C, mẫu hầu như không thay đổi hình dạng và không có vết nứt. Khi nhiệt độ tăng lên 600°C, bề mặt xuất hiện một số vết nứt chân chim nhỏ. Tại mức 900°C, mật độ vết nứt gia tăng nhưng cấu kiện vẫn duy trì toàn vẹn tính nguyên khối, hoàn toàn không xảy ra hiện tượng nứt vỡ đột ngột hay bong nổ cấu trúc như bê tông sử dụng xi măng Portland truyền thống.



Mẫu nung ở 300°C trong 3 giờ



Mẫu nung ở 600°C trong 3 giờ

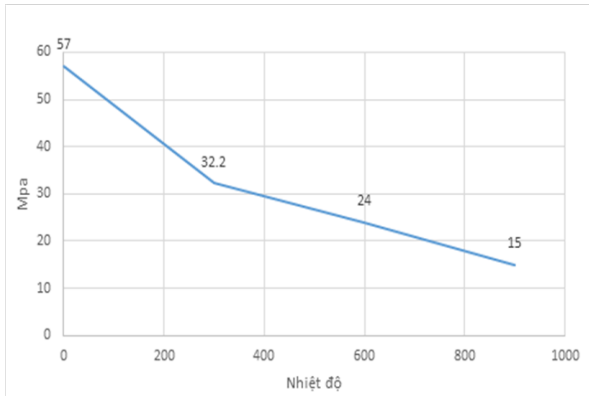


Mẫu nung ở 900°C trong 3 giờ

**Hình 6. Mẫu bê tông geopolymere sau khi nung ở các nhiệt độ khác nhau**

Kết quả thử nghiệm cường độ nén sau nung (Hình 7) ghi nhận xu hướng giảm dần khả năng chịu lực của vật liệu khi nhiệt độ tăng cao. Sự suy giảm cơ học này chủ yếu do hai nguyên nhân cốt lõi: (1) Hiện tượng mất nước liên kết trong cấu trúc gel geopolymere gây ứng suất nhiệt nội tại; và (2) Sự phân hủy nhiệt của pha carbonat<sub>10,89e</sub> trong cốt liệu đá dăm tự nhiên ở nhiệt độ cao, làm suy giảm liên kết giao diện giữa cốt liệu và ma trận nền (Hình 8).

Mặc dù có sự sụt giảm cường độ, bê tông geopolymere tro bay - xỉ lò cao vẫn khẳng định độ ổn định nhiệt vượt trội nhờ cốt lõi là mạng lưới liên kết alumino-silicate vô cơ có khả năng bền nhiệt cao [8], [18]. Đặc tính chịu nhiệt tốt này mở ra triển vọng ứng dụng an toàn cho các cấu kiện kết cấu trong điều kiện khắc nghiệt hoặc phòng chống cháy nổ.



Hình 7. Quan hệ giữa cường độ nén và nhiệt độ nung của bê tông geopolymer



Hình 8. Cấu trúc bên trong của mẫu bê tông geopolymer sau khi phá hủy ở 900°C

#### 4.5. Nghiên cứu thực nghiệm chế tạo tấm bê tông geopolymer lát mái kè đê biển

Nhằm đánh giá khả năng ứng dụng thực tế, nghiên cứu đã tiến hành chế tạo thử nghiệm tấm cấu kiện lát mái kè đê biển quy mô pilot (quy mô bán công nghiệp) trên cơ sở cấp phối tối ưu M2.

Để khắc phục nhược điểm khó sửa chữa, thay thế cục bộ của các mảng lát liền khối truyền thống, nghiên cứu lựa chọn giải pháp đúc sẵn cấu kiện dạng khối tự chèn. Kiểu dáng cấu kiện được thiết kế dựa trên công nghệ bảo vệ mái kè của Nhật Bản với đặc trưng: hai cạnh song song, hai cạnh còn lại khuyết lõm hình tam giác, bốn góc vát cạnh và bố trí hai lỗ thoát nước xuyên tâm. Thiết kế hình học này vừa tối ưu hóa khả năng liên kết khóa cơ học đa hướng giữa các khối, vừa giải phóng áp lực nước bốc ngược phía sau mái kè, ngăn ngừa hiện tượng xói lở nền móng.



Khuôn đổ khối bê tông tự chèn

Máy trộn mẻ lớn



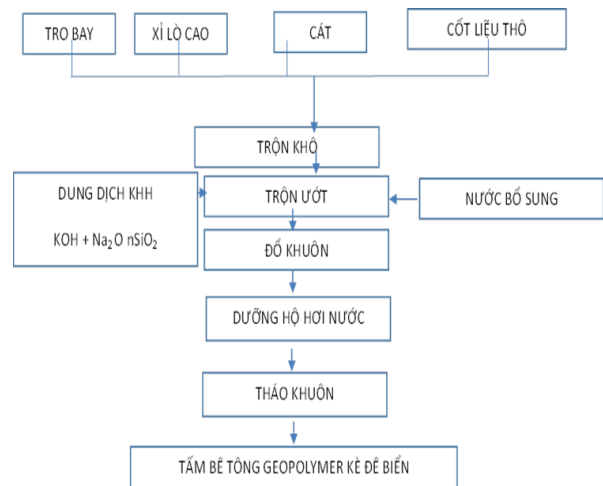
Nồi hơi Autoclave

Hộp cách nhiệt để dưỡng hồ

Hình 9. Thiết bị sử dụng trong quá trình chế tạo tấm bê tông geopolymer

##### 4.5.1. Quy trình công nghệ chế tạo cấu kiện thực tế

Quy trình công nghệ sản xuất cấu kiện quy mô pilot được chuẩn hóa theo sơ đồ hệ thống từ khâu xử lý tiền chất đến đóng rắn (Hình 10).



Hình 10. Sơ đồ công nghệ chế tạo tấm bê tông geopolymer lát mái đê biển

Ban đầu, các thành phần khô (tro bay tuyển, GGBS và hệ cốt liệu) được nhào trộn đồng nhất trong 6 phút bằng máy trộn mẻ lớn. Sau đó, dung dịch kích hoạt kiềm được phun bổ sung để

thực hiện quá trình trộn ướt trong 6 phút tiếp theo. Hỗn hợp bê tông geopolimer tươi sau khi trộn được kiểm tra và kiểm soát độ sụt trong dải 16,5–19,0 cm bằng một lượng nước hiệu chỉnh nhỏ, bảo đảm tính tối ưu cho công nghệ đổ khuôn định hình.



Cấu kiện bê tông  
Geopolimer tự chèn

Mảng bê tông  
Geopolimer kê mái đe  
biển

**Hình 11. Cấu kiện bê tông geopolimer tự chèn sau khi hoàn thiện**

Hỗn hợp đạt độ sụt được rót vào khuôn thép định hình cấu kiện tự chèn và đầm chặt trên hệ thống bàn rung công nghiệp để triệt tiêu bọt khí

**Bảng 7. Một số chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông geopolimer dùng cho cấu kiện tự chèn**

| Tên chỉ tiêu                      | Đơn vị                                    | Giá trị |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|---------|
| Cường độ nén                      | MPa                                       | 57,11   |
| Cường độ uốn                      | MPa                                       | 14,49   |
| Lực kéo đứt thép $\Phi 14$ CB400V | N                                         | 78 780  |
| Độ chống thấm                     | Không xuất hiện thấm nước ở áp lực 30 bar |         |

Mác cường độ nén cao (kháng nén trên 57 MPa) kết hợp với cường độ kéo khi uốn vượt trội (14,49 MPa) mang lại cho cấu kiện khả năng chịu tải cơ học đập nát ổn định và chống nứt bề mặt mạnh mẽ dưới tác động va đập liên tục của sóng biển hoặc tải trọng va quệt trong quá trình khai thác. Song song đó, mác chống thấm vượt cấp B12 đóng vai trò then chốt cô lập cấu trúc lòng vật liệu, ngăn chặn sự khuếch tán của nước biển và các ion xâm thực vào vùng giao diện cốt thép, từ đó bảo đảm độ bền lâu dài cho công trình ven biển. Về mặt sinh thái và kinh tế tuần hoàn, việc thay thế hoàn toàn xi măng Portland bằng tổ hợp tro bay tuyển sâu và xỉ lò cao không chỉ giải quyết triệt để bài toán diện tích lưu chứa chất thải của các nhà máy nhiệt điện, mà còn cắt giảm tối đa lượng phát thải khí nhà kính CO<sub>2</sub> từ công nghiệp clinker. Kết quả

nội tại. Công đoạn dưỡng hộ cốt lõi được thực hiện bằng hơi nước bão hòa trong buồng hộ cách nhiệt chuyên dụng. Hơi nước từ nồi hơi điện được phân phối qua hệ thống van điều áp để duy trì ổn định nhiệt độ buồng ở 80°C liên tục trong 8 giờ. Chế độ dưỡng hộ nhiệt bão hòa này là điều kiện quyết định để kích hoạt phản ứng geopolimer hóa toàn phần ở giai đoạn sớm, giúp cấu kiện nhanh chóng đạt cường độ kết cấu trước khi dỡ khuôn và đưa ra bãi bảo dưỡng tự nhiên.

#### 4.5.2. Thảo luận về khả năng ứng dụng trong công trình đê kè biển

Để đánh giá các chỉ tiêu kỹ thuật phục vụ chế tạo cấu kiện thực tế, hỗn hợp bê tông quy mô pilot được lấy mẫu kiểm tra các tính chất cơ lý và độ bền nước tại tuổi 28 ngày (Bảng 7).

Kết quả thực nghiệm tại Bảng 7 khẳng định bê tông geopolimer sử dụng tro bay Vĩnh Tân sau xử lý hoàn toàn đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật khắt khe đối với cấu kiện bảo vệ mái đê biển đảo.

này chứng minh cấu kiện geopolimer tự chèn từ tro bay Vĩnh Tân là giải pháp vật liệu xanh, bền vững cao và có tính khả thi thương mại lớn cho hệ thống hạ tầng ven biển Việt Nam.

## 5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 5.1. Kết luận

Từ các kết quả thực nghiệm nghiên cứu chế tạo bê tông geopolimer cường độ cao ứng dụng cho cấu kiện đê kè biển từ nguồn tro bay Nhiệt điện Vĩnh Tân, một số kết luận cốt lõi được rút ra như sau:

1. Giải pháp công nghệ xử lý kép gồm tuyển nổi sâu kết hợp phân cấp kích thước hạt giúp loại bỏ triệt để carbon chưa cháy, hạ chỉ số LOI của tro bay Vĩnh Tân từ 10,89% xuống còn 0,66%. Quy trình này nâng cấp hiệu quả tro bay thành tiền chất sạch, giàu pha alumino-silicate

hoạt tính cho phản ứng geopolymer hóa.

2. Cấp phối tối ưu M2 (sử dụng tro bay sạch kết hợp 15% GGBS) đạt các chỉ tiêu kỹ thuật cao tại tuổi 28 ngày: cường độ chịu nén đạt 57,11 MPa, cường độ kéo khi uốn đạt 14,49 MPa, lực bám dính cốt thép đạt 78.780 N (kéo đứt thép đường kính 14 mm) và mác chống thấm vượt cấp B12. Vật liệu bền vững cao trong môi trường xâm thực hóa học ( $H_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $MgSO_4$  nồng độ 2%) nhờ mạng lưới liên kết vô cơ Si-O-Al đặc chắc và trơ hóa học.

3. Thử nghiệm chế tạo quy mô pilot các tấm lát mái kè tự chèn đúc sẵn đạt độ đồng nhất cao, công nghệ dưỡng hộ nhiệt bảo hòa ổn định ở 80°C trong 8 giờ giúp cấu kiện sớm đạt cường độ kết cấu và hình học tối ưu theo bản vẽ thiết kế.

4. Việc thay thế hoàn toàn xi măng Portland bằng nguồn phụ phẩm công nghiệp (tro bay tuyển và xỉ lò cao) mở ra hướng đi đột phá trong việc tiêu thụ chất thải ví mô, tiết kiệm quỹ đất lưu chứa và giảm thiểu "dấu chân carbon" cho ngành vật liệu xây dựng.

## 5.2. Kiến nghị

1. Tiếp tục theo dõi và đánh giá độ bền lâu

dài của cấu kiện bê tông geopolymer ngoài hiện trường thực tế dưới tác động tổng hợp của môi trường biển xâm thực (chu kỳ khô - ướt, ion chloride, va đập cơ học của sóng và dòng chảy).

2. Mở rộng thử nghiệm sản xuất ở quy mô công nghiệp để chuẩn hóa bài toán kinh tế – kỹ thuật, xây dựng định mức cấp phối và hoàn thiện quy trình thi công, lắp đặt tấm tự chèn tại các công trình đê kè biển Việt Nam.

3. Triển khai các phân tích chuyên sâu về vi cấu trúc (SEM/EDS, XRD định lượng, MIP) ở các ngày tuổi muộn nhằm làm sáng tỏ động học phản ứng đa trùng ngưng, sự chuyển dịch các pha gel và cơ chế kháng xâm thực vi mô của hệ vật liệu.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST), mã số VAST03.02/17-18. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Viện Khoa học Vật liệu và Nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân đã hỗ trợ cơ sở vật chất, thiết bị và nguồn nguyên liệu phục vụ nghiên cứu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, 105–121.
2. Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. (2020). Fabrication and properties of industrial waste-based geopolymers: A review. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118861.
3. Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363.
4. Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171.
5. Neville, A. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
6. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
7. Juenger, M. C., & Siddique, R. (2021). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 145, 106435.
8. Davidovits, J. (2021). *Geopolymer Chemistry and Applications* (5th ed.). Institut Géopolymère, France.
9. Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2014). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*. Springer.
10. Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2023). Composition and microstructure of alkali-activated

- fly ash binder: Recent analytical findings. Cement and Concrete Research, 168, 107122.
11. Luhar, S., Luhar, I., & Shaikh, F. U. (2021). A review on the performance of fly ash-based geopolymer concrete. Journal of Building Engineering, 43, 103188.
  12. Wang, S., & Wu, H. (2022). Environmental and economic assessment of utilizing treated fly ash in geopolymer synthesis. Resources, Conservation and Recycling, 178, 106071.
  13. Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Curtin University of Technology, Perth, Australia.
  14. Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Hussein, A. A. (2022). Geopolymer mortars as sustainable repair material: An updated review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 154, 111824.
  15. Lahoti, M., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2022). A critical review of geopolymer properties for structural applications. Construction and Building Materials, 321, 126333.
  16. Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., & Mejía de Gutierrez, R. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. Cement and Concrete Composites, 33(1), 46–54.
  17. Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. Construction and Building Materials, 271, 121518.
  18. Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. Cement and Concrete Research, 35(4), 658–670.
  19. Viện Khoa học Vật liệu (2019). Báo cáo tổng hợp kết quả thực hiện đề tài KHCN thuộc các hướng KHCN ưu tiên cấp Viện Hàn lâm KHCNVN: Nghiên cứu công nghệ sản xuất vật liệu hữu ích từ tro xỉ nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân – Bình Thuận. Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

**Thông tin của tác giả:****Ths. Hồ Ngọc Hùng**

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

Điện thoại: 0917116659 - Email: [hunghn@ims.vast.ac.vn](mailto:hunghn@ims.vast.ac.vn)**NCS. Nguyễn Thu Thủy\***

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

Điện thoại: 0977037215 - Email: [thuthuyqn88@gmail.com](mailto:thuthuyqn88@gmail.com)**NCS. Nguyễn Văn Trọng**

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

Điện thoại: 0385688663 - Email: [trongnv@ims.vast.ac.vn](mailto:trongnv@ims.vast.ac.vn)

## RESEARCH ON THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF GEOPOLYMER CONCRETE USING VINH TAN THERMAL POWER PLANT FLY ASH FOR SEA DIKE REVETMENT APPLICATIONS

**Information about authors:****M.S. Ho Ngoc Hung**, Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology.Email: [hunghn@ims.vast.ac.vn](mailto:hunghn@ims.vast.ac.vn)**PhD Candidate Nguyen Thu Thuy\***, Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology. Email: [thuthuyqn88@gmail.com](mailto:thuthuyqn88@gmail.com)**PhD Candidate Nguyen Van Trong**, Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology. Email: [trongnv@ims.vast.ac.vn](mailto:trongnv@ims.vast.ac.vn)

**ABSTRACT:**

*This paper presents the research results on the production of geopolymer concrete using fly ash from the Vinh Tan Thermal Power Plant (Binh Thuan Province) for potential application in sea dike and coastal revetment structures. The original fly ash contained a high amount of unburned carbon (LOI = 10.89%), which adversely affected the geopolymerization process and the mechanical properties of the material. To overcome this limitation, the fly ash was treated by flotation combined with particle size classification to remove residual carbon and enhance the alumino-silicate reactivity. The results showed that the carbon content after treatment decreased to 0.66%, meeting the requirements for use as a geopolymer precursor. Geopolymer concrete was produced using the treated fly ash in combination with ground granulated blast furnace slag and alkaline activating solution. Experimental results indicated that the optimal mixture achieved a compressive strength of 57.11 MPa at 28 days, a flexural strength of 14.49 MPa, a steel pull-out force of 78,780 N, and a water permeability resistance exceeding grade B30. In addition, the material exhibited good resistance to acid and sulfate attack due to its dense geopolymer matrix. The study demonstrates that geopolymer concrete based on Vinh Tan fly ash has significant potential for application in concrete components for sea dike and coastal protection structures while contributing to industrial waste utilization and greenhouse gas emission reduction.*

**Keywords:** *Geopolymer concrete; Vinh Tan fly ash; carbon flotation; ground granulated blast furnace slag; sea dike and coastal revetment structures.*

**REFERENCES**

1. Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, 105–121.
2. Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. (2020). Fabrication and properties of industrial waste-based geopolymers: A review. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118861.
3. Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363.
4. Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171.
5. Neville, A. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
6. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
7. Juenger, M. C., & Siddique, R. (2021). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 145, 106435.
8. Davidovits, J. (2021). *Geopolymer Chemistry and Applications* (5th ed.). Institut Géopolymère, France.
9. Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2014). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*. Springer.
10. Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2023). Composition and microstructure of alkali-activated fly ash binder: Recent analytical findings. *Cement and Concrete Research*, 168, 107122.
11. Luhar, S., Luhar, I., & Shaikh, F. U. (2021). A review on the performance of fly ash-based geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 43, 103188.
12. Wang, S., & Wu, H. (2022). Environmental and economic assessment of utilizing treated fly ash in geopolymer synthesis. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106071.

13. Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Curtin University of Technology, Perth, Australia.
14. Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Hussein, A. A. (2022). Geopolymer mortars as sustainable repair material: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111824.
15. Lahoti, M., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2022). A critical review of geopolymer properties for structural applications. *Construction and Building Materials*, 321, 126333.
16. Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., & Mejía de Gutierrez, R. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 46–54.
17. Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2021). Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 271, 121518.
18. Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658–670.
19. Institute of Materials Science. (2019). Final Report of the Scientific Research Project under the Priority Science and Technology Program of the Vietnam Academy of Science and Technology: Research on Production Technology of Useful Materials from Fly Ash and Bottom Ash of Vinh Tan Thermal Power Plant – Binh Thuan. Vietnam Academy of Science and Technology.

**Ngày nhận bài:** 23/05/2026;

**Ngày nhận bài sửa:** 18/06/2026;

**Ngày chấp nhận đăng:** 19/06/2026.