

# Ảnh hưởng của cát nghiền đến độ sụt và cường độ chịu nén của bê tông geopolimer tro bay

Trần Kiều My<sup>1</sup>, Ngô Văn Thức<sup>1\*</sup>, Lê Tấn Truyền<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

## TỪ KHOÁ

Geopolymer tro bay  
Cát nghiền  
Độ sụt  
Cường độ chịu nén

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của cát nghiền đến độ sụt và cường độ chịu nén của bê tông geopolimer tro bay. Cát sông được thay thế bằng cát nghiền theo 5 mức: 0%, 25%, 50%, 75% và 100%. Kết quả cho thấy khi tỷ lệ cát nghiền tăng từ 0% đến 75%, độ sụt thay đổi không đáng kể và duy trì trong khoảng 20-21 cm; tuy nhiên, ở mức thay thế 100%, độ sụt giảm còn khoảng 14 cm. Về cường độ chịu nén, bê tông geopolimer có xu hướng tăng cường độ ở các mức thay thế cao, trong đó cấp phối sử dụng 100% cát nghiền đạt giá trị lớn nhất. Kết quả nghiên cứu cho thấy cát nghiền có thể thay thế cát sông trong bê tông geopolimer tro bay mà vẫn bảo đảm khả năng chịu nén, nhưng ở tỷ lệ thay thế quá cao có thể làm giảm tính công tác của hỗn hợp.

## KEYWORDS

Fly ash-based geopolymer  
Crushed sand  
Slump  
Compressive strength

## ABSTRACT

This study evaluates the effect of crushed sand on the slump and compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. River sand was replaced with crushed sand at five levels: 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. The results show that as the crushed sand replacement ratio increased from 0% to 75%, the slump changed insignificantly, remaining within the range of 20-21 cm; however, at the 100% replacement level, the slump decreased to about 14 cm. In terms of compressive strength, the geopolymer concrete tended to gain higher strength at high replacement levels, with the mixture containing 100% crushed sand achieving the highest value. The findings indicate that crushed sand can replace river sand in fly ash-based geopolymer concrete while maintaining compressive strength, though excessively high replacement ratios may reduce workability.

## 1. Giới thiệu

Ngành xây dựng hiện nay đang đối mặt với yêu cầu cấp thiết về giảm phát thải khí nhà kính và sử dụng hiệu quả tài nguyên thiên nhiên. Trong đó, xi măng Portland là một trong những nguồn phát thải CO<sub>2</sub> đáng kể do quá trình nung clinker [1], vì vậy việc phát triển các vật liệu thay thế có mức phát thải thấp hơn đang nhận được nhiều quan tâm. Bê tông geopolimer được xem là một hướng tiếp cận triển vọng nhờ sử dụng các nguồn vật liệu giàu aluminosilicat, điển hình là tro bay (FA), kết hợp với dung dịch kiềm hoạt hóa để tạo chất kết dính vô cơ mà không phụ thuộc hoàn toàn vào xi măng Portland [2][3].

Về bản chất, chất kết dính geopolimer được hình thành thông qua quá trình hòa tan, tái sắp xếp và trùng ngưng các pha hoạt tính giàu Si và Al trong môi trường kiềm, tạo nên mạng alumino-silicat ba chiều có độ đặc chắc cao [4]. Nhiều nghiên cứu cho thấy bê tông geopolimer FA có khả năng phát triển cường độ tốt, độ bền tương đối cao và tiềm năng ứng dụng trong xây dựng bền vững [2],[3]. Nhờ đó, vật liệu này ngày càng được quan tâm không chỉ ở khía cạnh môi trường mà còn ở phương diện kỹ thuật và khả năng sử dụng các nguồn phế thải công nghiệp.

Song song với bài toán giảm phát thải từ chất kết dính là vấn đề khan hiếm cát tự nhiên dùng cho bê tông. Việc khai thác cát sông quá mức trong thời gian dài đã gây ra nhiều hệ lụy về môi trường và làm gia tăng nhu cầu tìm kiếm nguồn cốt liệu mịn thay thế. Cát nghiền được xem là một giải pháp khả thi do có thể chủ động về nguồn cung, chất lượng và tận dụng được nguồn đá xây dựng sẵn có. Tuy nhiên, khác với cát tự nhiên, cát nghiền thường có hình dạng hạt góc cạnh, bề mặt nhám và hàm lượng hạt mịn cao hơn, nên có thể làm tăng nhu cầu nước, giảm độ công tác của hỗn hợp và ảnh hưởng đến quá trình hình thành cấu trúc của bê tông [5][6]. Một số nghiên cứu cũng cho thấy việc sử dụng cát nghiền có thể làm thay đổi đáng kể tính công tác và cường độ cơ học của bê tông, tùy thuộc vào tỷ lệ thay thế, đặc điểm và thành phần hạt [7][8].

Đối với bê tông geopolimer, ảnh hưởng của cát nghiền càng cần được xem xét kỹ hơn do loại vật liệu này có cơ chế đóng rắn khác với bê tông xi măng truyền thống. Ở Việt Nam, các nghiên cứu về bê tông geopolimer thời gian gần đây chủ yếu tập trung vào ảnh hưởng của thành phần chất kết dính, dung dịch hoạt hóa, điều kiện dưỡng hộ, hoặc sử dụng cát sông, cát biển và cốt liệu nhiễm mặn; trong khi đó, các công bố chuyên biệt về ảnh hưởng của cát nghiền thay thế cát

\*Liên hệ tác giả: ngovanthuc@mtu.edu.vn

Nhận ngày 08/04/2026, sửa xong ngày 25/04/2026, chấp nhận đăng ngày 28/04/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1318>

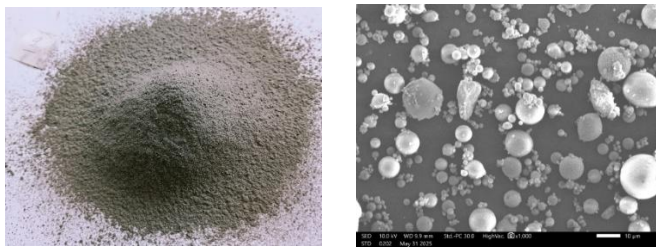
tự nhiên đến độ sụt và cường độ chịu nén của bê tông geopolimer FA còn rất hạn chế [9].

Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của cát nghiền đến hai chỉ tiêu quan trọng của bê tông geopolimer FA, gồm độ sụt của hỗn hợp bê tông tươi và cường độ chịu nén của bê tông đóng rắn. Cát tự nhiên được thay thế bằng cát nghiền theo các tỷ lệ khác nhau nhằm làm rõ xu hướng biến đổi của tính công tác và cường độ chịu nén, từ đó góp phần bổ sung cơ sở thực nghiệm cho việc sử dụng cát nghiền trong chế tạo bê tông geopolimer theo định hướng phát triển vật liệu xây dựng bền vững.

## 2. Vật liệu sử dụng

### 2.1. Tro bay

Tro bay được sử dụng trong nghiên cứu này có nguồn gốc từ Nhà máy nhiệt điện Duyên Hải 3 - tỉnh Vĩnh Long. Hình 1-a cho thấy FA có dạng bột mịn màu xám, tương đối đồng nhất. Ảnh SEM cho thấy các hạt tro bay chủ yếu có dạng gần cầu, phân bố kích thước khá rộng và có xuất hiện một số hạt kết tụ (Hình 1-b). Kết quả phân tích thành phần hóa học trong Bảng 1 cho thấy vật liệu này có hàm lượng các oxit chính gồm SiO<sub>2</sub> (45,53 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (23,94 %) và Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14,34 %), với tổng hàm lượng ba oxit đạt khoảng 83,81 %. Đây là đặc trưng điển hình của tro bay loại F theo phân loại của ASTM C618 [10].



a) Hình thái bên ngoài

b) Ảnh SEM

**Hình 1.** Tro bay Duyên Hải 3 sử dụng trong nghiên cứu.

### 2.2. Dung dịch kiềm kích hoạt



a) NaOH khô

b) Dung dịch Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

**Hình 2.** Các thành phần của dung dịch kiềm

kích hoạt sử dụng trong nghiên cứu.

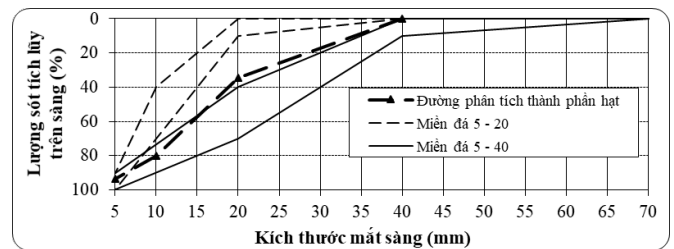
Dung dịch kiềm kích hoạt sử dụng trong nghiên cứu gồm natri hydroxit (NaOH) và natri silicat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>). NaOH ở dạng vảy khô (Hình 2-a), độ tinh khiết 99 %, được hòa tan bằng nước máy để pha dung dịch có nồng độ 10M. Do quá trình hòa tan NaOH tỏa nhiệt, dung dịch được chuẩn bị trước 24 giờ và bảo quản ở nhiệt độ phòng trước khi sử dụng.

Dung dịch Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> có thành phần gồm 11,8 % Na<sub>2</sub>O, 29,5 % SiO<sub>2</sub> và 58,7 % nước (Hình 2-b). Sau khi dung dịch NaOH ổn định nhiệt độ, NaOH và Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> được phối trộn để tạo dung dịch kiềm kích hoạt dùng cho quá trình chế tạo bê tông geopolimer. Hệ dung dịch này có vai trò tạo môi trường kiềm mạnh để hòa tan các pha hoạt tính trong tro bay và thúc đẩy quá trình hình thành gel aluminosilicat.

Trong nghiên cứu này, dung dịch kiềm kích hoạt được sử dụng thống nhất cho toàn bộ chương trình thí nghiệm nhằm bảo đảm tính đồng nhất của quá trình hoạt hóa và hạn chế ảnh hưởng của các yếu tố ngoài biến khảo sát.

### 2.3. Cốt liệu thô

Cốt liệu thô dùng trong nghiên cứu là đá dăm 1×2. Kết quả phân tích thành phần hạt theo TCVN 7570:2006 (Hình 3) cho thấy cấp phối cốt liệu tương đối liên tục, nằm trong phạm vi cho phép và đáp ứng yêu cầu sử dụng cho bê tông geopolimer.



**Hình 3.** Biểu đồ thành phần hạt của đá.

### 2.4. Cốt liệu mịn

Thành phần hạt của cát sông và cát nghiền được trình bày ở Hình 4. Cát sông có mô đun độ lớn 1,9, thuộc nhóm cát mịn, trong khi cát nghiền có giá trị 3,2, thuộc nhóm cát thô hơn. Đường cấp phối của cát sông nằm gần miền cát hạt mịn, còn cát nghiền dịch về phía miền cát hạt thô. Đặc điểm này cho thấy cát nghiền có thể làm giảm tính công tác của hỗn hợp nhưng có khả năng cải thiện độ đặc chắc của bê tông khi sử dụng với tỷ lệ phù hợp.

Ngoài thành phần hạt và mô đun độ lớn, một số tính chất vật lý cơ bản của cát sông và cát nghiền cũng được xác định nhằm làm rõ hơn sự khác biệt giữa hai loại cốt liệu mịn sử dụng trong nghiên cứu. Kết quả được trình bày trong Bảng 2. Kết quả cho thấy cát nghiền có độ hút nước thấp hơn và khối lượng thể tích lớn hơn so với cát sông, trong khi độ rỗng lại cao hơn, nguyên nhân là do hệ hạt góc cạnh nên tạo ra nhiều khoảng rỗng hơn so với cát sông.

**Bảng 1.** Thành phần hóa học và tính chất của tro bay.

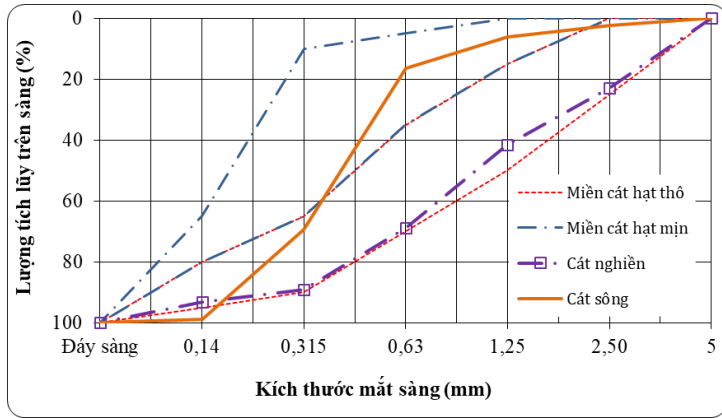
Thành phần hóa học của tro bay (%)									Mất khi nung (%)
C	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
7,06	0,69	1,52	23,94	45,53	2,97	2,62	1,34	14,34	1,09



Cát sông



Cát nghiền



**Hình 4.** Biểu đồ thành phần hạt của cát sông và cát nghiền.

**Bảng 2.** Một số tính chất vật lý cơ bản của cát sông và cát nghiền.

Loại cát	Tính chất		
	Độ hút nước (%)	Khối lượng thể tích (kg/m <sup>3</sup> )	Độ rỗng (%)
Cát sông	5,82	1522	34,8
Cát nghiền	2,67	1547	39,2

**3. Thành phần cấp phối và phương pháp thí nghiệm**

**3.1. Thành phần cấp phối**

Thành phần thiết kế cấp phối của bê tông geopolymer được trình bày trong Bảng 3. Trong nghiên cứu này, cát tự nhiên được thay thế bằng cát nghiền theo 5 mức: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % và 100 %, tương ứng với các cấp phối ký hiệu CN-0, CN-25, CN-50, CN-75 và CN-100. Để làm rõ ảnh hưởng của cát nghiền, các thành phần còn lại của hỗn hợp được giữ không đổi giữa các cấp phối. Cụ thể, tro bay được sử dụng làm tiền chất aluminosilicat; dung dịch kiềm hoạt động gồm NaOH và Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, trong đó tỷ lệ khối lượng Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH được

giữ ở mức 2,5, tỷ lệ dung dịch kiềm hoạt/tro bay bằng 0,4. Khối lượng thể tích của bê tông được lựa chọn là 2400 kg/m<sup>3</sup>.

Từ các tỷ lệ này, thành phần dung dịch kiềm hoạt hóa tương ứng trong cấp phối được xác định là 49 kg/m<sup>3</sup> NaOH 10M và 123 kg/m<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, trong khi hàm lượng tro bay là 428 kg/m<sup>3</sup>. Lượng cốt liệu mịn được duy trì ở mức 540 kg/m<sup>3</sup>, với tỷ lệ giữa cát sông và cát nghiền thay đổi theo từng cấp phối; hàm lượng đá dăm được giữ ở mức 1260 kg/m<sup>3</sup> cho các tổ mẫu. Các thông số của hệ kiềm hoạt hóa được lựa chọn theo cấp phối tham khảo từ các nghiên cứu trước [11] và được giữ cố định trong toàn bộ chương trình thí nghiệm.

**Bảng 3.** Thành phần thiết kế cấp phối của bê tông geopolymer (cho 1m<sup>3</sup>).

Kí hiệu	Cát nghiền (kg)	Cát tự nhiên (kg)	Đá (kg)	NaOH (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	Tro bay (kg)
CN-0	0	540	1260	49	123	428
CN-25	135	405	1260	49	123	428
CN-50	270	270	1260	49	123	428
CN-75	405	135	1260	49	123	428
CN-100	540	0	1260	49	123	428

### 3.2. Phương pháp thí nghiệm

Các mẫu bê tông geopolimer được chế tạo theo cấp phối thiết kế và đúc thành mẫu lập phương kích thước  $150 \times 150 \times 150$  mm. Tổng cộng có 5 tổ mẫu, tương ứng với 5 tỷ lệ thay thế cát nghiền; mỗi cấp phối gồm 3 mẫu, tổng số mẫu nén là 15 mẫu. Sau khi trộn, hỗn hợp bê tông được xác định độ sụt theo TCVN 3106:2022 nhằm đánh giá tính công tác của hỗn hợp tươi. Sau khi đúc, mẫu được giữ trong khuôn trong khoảng 24h ở điều kiện phòng thí nghiệm. Sau khi tháo khuôn, các mẫu được bảo dưỡng trong điều kiện môi trường tự nhiên của phòng thí nghiệm (không ngâm nước), với nhiệt độ khoảng  $30^\circ\text{C}$  cho đến tuổi thí nghiệm 28 ngày.

Cường độ chịu nén của bê tông geopolimer được xác định ở tuổi 28 ngày theo TCVN 3118:2022. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén được sử dụng làm cơ sở để đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế cát tự nhiên bằng cát nghiền đến tính chất cơ học của bê tông geopolimer tro bay. Trong nghiên cứu này, hai chỉ tiêu được lựa chọn để đánh giá là độ sụt của hỗn hợp bê tông tươi và cường độ chịu nén của bê tông đóng rắn. Quá trình thí nghiệm được minh họa ở Hình 5.



**Hình 5.** Thí nghiệm độ sụt và thí nghiệm nén mẫu bê tông geopolimer.

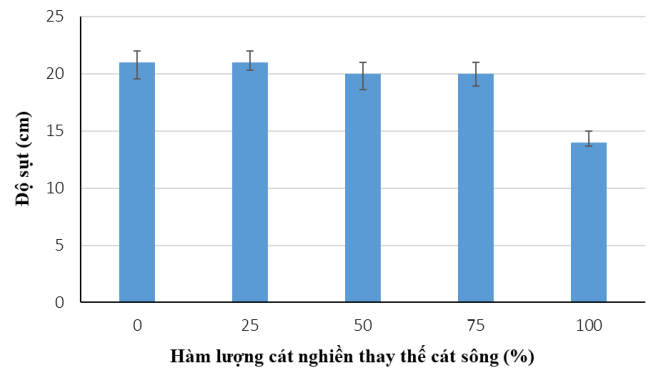
## 4. Kết quả thí nghiệm

### 4.1. Độ sụt

Kết quả thí nghiệm độ sụt ở Hình 6 cho thấy khi hàm lượng cát nghiền thay thế cát sông tăng từ 0 % đến 75 %, độ sụt của hỗn hợp bê tông hầu như không thay đổi đáng kể, dao động quanh 20-21 cm. Tuy nhiên, khi thay thế hoàn toàn cát sông bằng cát nghiền (100 %), độ sụt giảm rõ rệt xuống khoảng 14 cm, tương đương mức giảm khoảng 30-33 % so với mẫu đối chứng. Xu hướng này cho thấy trong cấp phối nghiên cứu, cát nghiền có thể được sử dụng ở mức thay thế đến 75 % mà vẫn duy trì được tính công tác tương đối ổn định; ngược lại, ở mức thay thế 100 %, tính công tác của hỗn hợp bị suy giảm rõ rệt.

Nguyên nhân chủ yếu là do cát nghiền có hạt góc cạnh làm tăng ma sát nội và nhu cầu hồ geopolimer bao phủ bề mặt cốt liệu. Xu hướng này phù hợp với nghiên cứu của Mermerdaş và cộng sự [12],

trong đó vữa geopolimer dùng cát tự nhiên cho độ chảy tốt hơn hỗn hợp dùng cốt liệu nghiền.



**Hình 6.** Ảnh hưởng của hàm lượng cát nghiền đến độ sụt của bê tông geopolimer.

Hình 7 cho thấy mẫu bê tông dùng 100 % cát nghiền xuất hiện rõ bề mặt rỗ rết, cho thấy hỗn hợp kém linh động, khó đầm chặt và dễ giữ lại bọt khí; hiện tượng này cũng phù hợp với nhận định của Malkawi và c.s [13] rằng hỗn hợp có độ sụt thấp dễ làm tăng độ rỗng và lượng khí bị cuốn giữ trong bê tông.



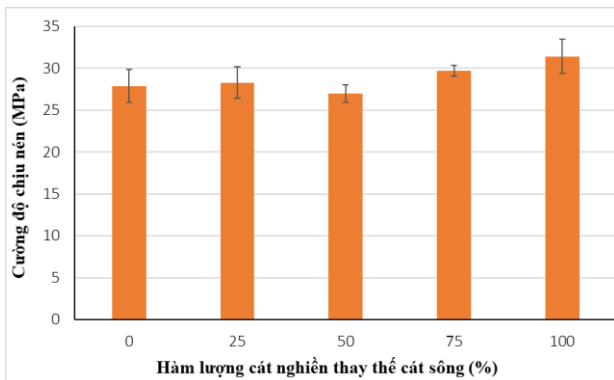
**Hình 7.** Mẫu bê tông geopolimer sử dụng 100 % cát nghiền xuất hiện rỗ bề mặt.

### 4.2. Cường độ chịu nén

Kết quả ở Hình 8 cho thấy cường độ chịu nén của bê tông geopolimer biến thiên không hoàn toàn tuyến tính theo hàm lượng cát nghiền thay thế cát sông. Ở mức thay thế 25 %, cường độ tăng nhẹ so với mẫu đối chứng; tại mức 50 %, cường độ giảm nhẹ; sau đó tăng rõ ở các mức 75 % và 100 %, trong đó cấp phối sử dụng 100 % cát nghiền đạt giá trị lớn nhất. Nhìn chung, trong điều kiện thí nghiệm này, việc tăng tỷ lệ cát nghiền đến 75-100 % có xu hướng cải thiện cường độ chịu nén của bê tông geopolimer tro bay.

Xu hướng trên có thể được giải thích bởi sự thay đổi đặc trưng của cốt liệu mịn khi thay cát sông bằng cát nghiền. Khi tăng tỷ lệ cát nghiền, cấp phối hạt của hệ cốt liệu mịn được dịch chuyển từ vùng

quá mịn sang vùng thô hơn, góp phần cải thiện khả năng chèn lấp và độ đặc chắc của vật liệu. Li và cộng sự [14] khi nghiên cứu vữa geopolimer tro bay đã ghi nhận rằng khi cốt liệu mịn có cỡ hạt lớn, cường độ nén và cường độ uốn đều tăng, trong khi diện tích bề mặt riêng và độ rỗng giảm. Tương tự, Malkawi [13] cho thấy mô đun độ lớn của cát là một tham số có ảnh hưởng có ý nghĩa đến cường độ chịu nén của bê tông geopolimer tro bay, với giá trị tối ưu xấp xỉ 2,8 trong phạm vi khảo sát của tác giả.



Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng cát nghiền đến cường độ chịu nén.

Mặt khác, việc dùng cát nghiền ở tỷ lệ cao còn có thể cải thiện liên kết cơ học giữa cốt liệu mịn và hồ geopolimer do đặc trưng hạt góc cạnh. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Mermerdaş và cộng sự trên vữa geopolimer tro bay, trong đó hỗn hợp sử dụng cốt liệu nghiền cho cường độ nén cao hơn hỗn hợp dùng cát sông tự nhiên; tác giả cũng ghi nhận giá trị cường độ lớn nhất đạt được với cấp hạt nghiền phù hợp, trong khi cát sông tự nhiên cho giá trị thấp hơn [12]. Đồng thời, Malkawi cũng chỉ ra rằng các tham số cốt liệu không chỉ ảnh hưởng đến cường độ mà còn ảnh hưởng đến độ sụt, hàm lượng khí và thể tích lỗ rỗng thấm được của bê tông geopolimer [13]. Vì vậy, sự giảm nhẹ cường độ ở mức thay thế 50% trong nghiên cứu này có thể xem là trạng thái chuyển tiếp, khi hiệu quả cải thiện khung cốt liệu chưa thật sự rõ, trong khi tính công tác đã bắt đầu giảm, dẫn đến nguy cơ tăng lỗ rỗng trong quá trình tạo mẫu.

## 5. Kết luận và khuyến nghị

Từ kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của cát nghiền đến độ sụt và cường độ chịu nén của bê tông geopolimer tro bay, có thể rút ra một số kết luận sau:

- Cát nghiền có thể sử dụng để thay thế cát sông trong bê tông geopolimer tro bay mà vẫn bảo đảm khả năng phát triển cường độ chịu nén trong phạm vi khảo sát. Tuy nhiên, ảnh hưởng của cát nghiền đến hỗn hợp bê tông không chỉ thể hiện ở cường độ mà còn ở tính công tác, đặc biệt khi sử dụng ở tỷ lệ thay thế cao.
- Mức thay thế cát sông bằng cát nghiền đến khoảng 75 % cho thấy hiệu quả sử dụng phù hợp hơn xét trên đồng thời hai chỉ tiêu độ sụt và cường độ chịu nén. Trường hợp thay thế 100 % cát

sông bằng cát nghiền vẫn cho thấy tiềm năng về cường độ, nhưng làm giảm tính công tác của hỗn hợp, từ đó có thể ảnh hưởng đến chất lượng tạo hình và bề mặt mẫu.

- Để đánh giá đầy đủ hơn hiệu quả sử dụng cát nghiền trong bê tông geopolimer tro bay, các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng sang một số chỉ tiêu như độ hút nước, độ rỗng, độ bền lâu và các đặc trưng vi cấu trúc của vật liệu. Đồng thời, cần xem xét thêm ảnh hưởng của phụ gia siêu dẻo, độ ẩm cốt liệu và thành phần hạt đến tính công tác của hỗn hợp khi sử dụng hàm lượng cát nghiền cao

## Tài liệu tham khảo

- [1]. L. B. A. Negrão, H. Pöllmann, and M. L. da Costa, "Production of low-CO2 cements using abundant bauxite overburden 'Belterra Clay,'" *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 29, p. e00299, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00299.
- [2]. K. Zerfu and J. J. Ekaputri, "Review on Alkali-Activated Fly Ash Based Geopolymer Concrete," *Mater. Sci. Forum*, vol. 841, pp. 162–169, Jan. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.841.162.
- [3]. B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, and S. K. Bhattacharyya, "Geopolymer concrete: A review of some recent developments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78–90, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.
- [4]. P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. van Deventer, "Geopolymer technology: the current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, May 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [5]. Phan Văn Quỳnh, Nguyễn Văn Đoàn, and Dương Thanh Qui, "Ảnh hưởng của cát nghiền đến một số tính chất của bê tông," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, vol. 15, no. 06, Oct. 2025, doi: 10.54772/jomc.06.2025.1130.
- [6]. Hoàng Minh Đức and Lê Văn Thắng, "Ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn đến độ sụt của hỗn hợp bê tông sử dụng cát nghiền," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, vol. 1, 2021.
- [7]. D.-T. Nguyen, D.-L. Nguyen, and M. Ngoc-Tra Lam, "An experimental investigation on the utilization of crushed sand in improving workability and mechanical resistance of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 326, p. 126766, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126766.
- [8]. H. P. Nam and V. H. Trí, "Xử lý đá phế phẩm thành cát nghiền và nghiên cứu tính công tác của hỗn hợp bê tông thương phẩm sử dụng cát nghiền," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, no. 1, Feb. 2021, doi: 10.54772/jomc.1.2021.8.
- [9]. Lê Thanh Hà, Đặng Thùy Chi, and Nguyễn Thị Thu Thủy, "Nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia siêu dẻo đến tính chất của vữa Geopolyme sử dụng tro bay và xi lò cao," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, vol. 15, no. 02, Mar. 2025, doi: 10.54772/jomc.02.2025.837.
- [10]. ASTM C618-05, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," 2005, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1063/1.4756275.
- [11]. Trần Việt Hưng, "Nghiên cứu thành phần, đặc tính cơ lý của bê tông geopolimer tro bay và ứng dụng cho kết cấu cầu hầm," *Trường Đại học Giao thông vận tải, Việt Nam*, 2017.
- [12]. K. Mermerdaş, S. Manguri, D. E. Nassani, and S. M. Oleiwi, "Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolimer mortar," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 6, pp. 1642–1652, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2017.11.009.

- [13]. A. B. Malkawi, "Effect of Aggregate on the Performance of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete," *Buildings*, vol. 13, no. 3, p. 769, Mar. 2023, doi: 10.3390/buildings13030769.
- [14]. H. Li et al., "Effect of Fine Aggregate Particle Characteristics on Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar," *Minerals*, vol. 11, no. 8, p. 897, Aug. 2021, doi: 10.3390/min11080897.