

## ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG CHẤT KIỀM HOẠT HÓA ĐẾN TÍNH CÔNG TÁC VÀ CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN CỦA VỮA GEOPOLYMER

EFFECT OF ALKALI ACTIVATOR CONTENT ON THE WORKABILITY  
AND COMPRESSIVE STRENGTH OF GEOPOLYMER MORTAR

PHẠM PHƯƠNG DUYÊN<sup>1</sup>, NGUYỄN KIM THANH<sup>1</sup>,  
NGUYỄN CÔNG MINH HIẾU<sup>1</sup>, TRỊNH VĂN SÁNG<sup>1</sup>, NGUYỄN ANH ĐỨC<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Sinh viên Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

<sup>2</sup>Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: ducna.ctt@vimar.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.987>

### Tóm tắt

Việt Nam đang đẩy mạnh phát triển cơ sở hạ tầng, dẫn đến nhu cầu vật liệu xây dựng gia tăng đáng kể. Xi măng, một trong những vật liệu chủ đạo, được sử dụng với khối lượng lớn. Quá trình sản xuất xi măng phát thải một lượng khí CO<sub>2</sub> đáng kể, gây ra những tác động tiêu cực đến môi trường. Cùng với đó, lượng phụ phẩm công nghiệp ngày càng lớn từ các ngành sản xuất cũng đặt ra bài toán xử lý hoặc tái chế nhằm giảm thiểu nguy cơ ô nhiễm. Trước bối cảnh này, nghiên cứu đề xuất giải pháp sử dụng xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GBS), một phụ phẩm của quá trình luyện gang thép, làm phụ gia khoáng kết hợp với chất kiềm hoạt hóa (AA) để thay thế toàn bộ xi măng trong thiết kế thành phần cấp phối. Kết quả thực nghiệm cho thấy, hỗn hợp vữa chứa GBS và chất kiềm hoạt hóa vẫn đảm bảo tính công tác và có cường độ chịu nén phù hợp cho các ứng dụng của vữa. Trong đó, mẫu vữa sử dụng 5% AA và 95% GBS đạt cường độ nén cao nhất ở cả hai thời điểm 7 ngày và 28 ngày, đồng thời thể hiện sự phát triển cường độ rất hiệu quả trong giai đoạn này nhờ phản ứng tạo gel C-S-H.

**Từ khóa:** Xi hạt lò cao nghiền mịn, tái chế, chất kiềm hoạt hóa, vữa geopolimer, phát triển bền vững.

### Abstract

Currently, Vietnam is focusing on the infrastructure development, leading to a huge demand for construction materials. The extensive use of cement, however, entails significant environmental consequences, as its production process generates substantial CO<sub>2</sub> emissions.

Concurrently, the increasing volume of industrial by-products from manufacturing sectors poses challenges for disposal or recycling to mitigate pollution risks. In response to this context, this study proposes a solution utilizing ground granulated blast-furnace slag (GBS), a by-product of steel production, as a mineral additive combined with an alkaline activator to fully replace cement in mix proportion. The aim is to recycle industrial by-products and contribute to carbon emission reduction in construction. Experimental results indicate that mortar mixtures containing GBS and alkaline activator maintain workability and achieve compressive strength suitable for mortar applications. The mortar specimen with 5% AA and 95% GBS achieved the highest compressive strength at both 7 and 28 days, while also demonstrating highly effective strength development during this period due to the C-S-H gel formation reaction.

**Keywords:** Ground granulated blast-furnace slag, recycle, alkaline activator, geopolimer mortar, sustainable development.

### 1. Mở đầu

Trong bối cảnh ngành xây dựng phát triển mạnh, Việt Nam dự kiến vẫn là một quốc gia sản xuất xi măng trọng yếu trên thế giới vào năm 2025. Mức sản lượng dự kiến 110 triệu tấn đi kèm với xu hướng tăng trưởng ổn định của lượng tiêu thụ trong nước [1]. Việc sản xuất sản lượng lớn xi măng khiến lượng phát thải CO<sub>2</sub> tăng đột biến [2], khí này được xác định là một chất gây hiệu ứng nhà kính chính, có tác động đáng kể đến hệ thống môi trường toàn cầu và là nguyên nhân trực tiếp dẫn đến biến đổi khí hậu [3].

Bên cạnh đó tại Việt Nam, các nhà máy luyện gang thép có sản lượng lên tới 16 triệu tấn/ năm [4]. Khối lượng xi thép phát sinh trong quá trình sản xuất lên tới 3,5 triệu tấn/ năm [5]. Trong đó, xi hạt lò cao được tạo ra bằng phương pháp làm lạnh nhanh thông qua phun nước áp lực cao, từ đó hình thành các hạt có cấu trúc rỗng, xốp [6]. Việc không xử lý hiệu quả loại phụ phẩm công nghiệp này sẽ dẫn đến chiếm dụng quỹ đất, gây ô nhiễm nguồn nước, ô nhiễm đất và tạo ra các tác động tiêu cực đến môi trường.

Trước những vấn đề nêu trên, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc sử dụng phụ phẩm công nghiệp trong vữa dưới dạng phụ gia khoáng nhằm giảm khối lượng xi măng sử dụng trong thành phần cấp phối. Tuy nhiên, các nghiên cứu khác vẫn chưa đưa ra ảnh hưởng của hàm lượng chất kiềm hoạt hóa đối với tính công tác của vữa. Đồng thời, việc sử dụng loại kiềm hoạt hóa phổ biến trên thị trường nhằm nâng cao tính ứng dụng của vật liệu vữa cũng chưa được quan tâm.

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, xi măng được thay thế bằng xi hạt lò cao nghiền mịn với các mức thay thế lần lượt là 85%, 90% và 95% trong cấp phối vữa. Ngoài ra, chất kiềm hoạt hóa được bổ sung tương ứng với các tỷ lệ 15%, 10% và 5% trong tổng lượng chất kết dính, nhằm loại bỏ hoàn toàn việc sử dụng xi măng. Hàm lượng chất kiềm hoạt hóa từ 5% đến 15% chưa được nghiên cứu cụ thể về tính công tác. Đồng thời, nghiên cứu muốn sử dụng tối đa hàm lượng xi hạt lò cao nghiền mịn nhằm mục tiêu giảm phát thải carbon nhiều nhất. Kết quả thí nghiệm cho thấy khi so sánh với mẫu đối chứng, các mẫu vữa không sử dụng xi măng vẫn có tính công tác tốt và có cường độ chịu nén đảm bảo sử dụng trong các công trình xây dựng giúp mở ra hướng ứng dụng phát triển bền vững.

## 2. Vật liệu

### 2.1. Chất kết dính

Mẫu đối chứng sử dụng xi măng PC (OPC) có chỉ tiêu chất lượng như trong Bảng 1. Các mẫu còn lại sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn S95 (GBS) và chất kiềm hoạt hóa (AA) với hàm lượng  $\text{Ca(OH)}_2$  là thành phần chính và là thành phần kiềm duy nhất làm chất kết dính có chỉ tiêu chất lượng như trong Bảng 1. Hình ảnh chất kết dính được thể hiện trong Hình 1.

### 2.2. Cốt liệu

Cát sông (RS) được lựa chọn làm cốt liệu mịn trong hỗn hợp vữa của nghiên cứu này. Theo kết quả thí nghiệm được tổng hợp tại Bảng 2, cát có khối lượng thể tích khô là  $2,53\text{g/cm}^3$  và độ hút nước đạt 1,32%. Hình 1 thể hiện hình thái của loại cát này..

**Bảng 1. Chỉ tiêu chất lượng chất kết dính**

Hạng mục	Đơn vị	OPC <sup>1</sup>	GBS <sup>2</sup>	AA <sup>3</sup>
Khối lượng riêng	$\text{g/cm}^3$	3,16	2,89	2,21
Mất khi nung	%	2,87	0,09	-
$\text{SiO}_2$	%	-	34,14	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	%	-	15,06	-
$\text{CaO}$	%	-	41,01	-
$\text{MgO}$	%	-	7,35	-
$\text{SO}_3$	%	2,00	0,11	-
$\text{Cl}^-$	%	-	0,002	-
pH	-	-	-	$\geq 12$
$\text{Ca(OH)}_2$	%	-	-	$\geq 90$

<sup>1</sup>OPC: Xi măng Portland;

<sup>2</sup>GBS: Xi hạt lò cao nghiền mịn S95; <sup>3</sup>AA: Chất kiềm hoạt hóa.

**Bảng 2. Tính chất cốt liệu**

Hạng mục	Đơn vị	RS <sup>1</sup>
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa nước	$\text{g/cm}^3$	2,56
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	$\text{g/cm}^3$	2,53
Độ hút nước	%	1,32
Mô đun độ lớn	-	2,67

<sup>1</sup>RS: Cát tự nhiên (cát sông).



**Hình 1. Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu: (a) xi măng Portland, (b) cát sông, (c) xi hạt lò cao nghiền mịn, (d) chất kiềm hoạt hóa**

## 3. Thành phần cấp phối

Thành phần cấp phối cho tất cả các mẫu trong nghiên cứu được thiết kế với lượng nước cố định  $270\text{kg/m}^3$  và tỷ lệ nước/ chất kết dính (W/B) là 0,45.

Tỷ lệ nước: Chất kết dính: Cát sông là 1:2,2:5,0. Mẫu đối chứng được chế tạo từ 100% xi măng Portland thông thường (OPC). Các mẫu còn lại được thiết kế với thành phần chất kết dính là hỗn hợp, trong đó xi măng OPC được thay thế hoàn toàn bằng xi hạt lò cao nghiền mịn (GBS) với các tỷ lệ thay thế lần lượt là 85%, 90% và 95% kết hợp với chất kiềm hoạt hóa (AA) với tỷ lệ lần lượt là 15%, 10%, và 5%. Cát sông là cốt liệu mịn duy nhất được sử dụng, được xử lý ở trạng thái bão hòa nước - khô bề mặt trước khi đưa vào trộn. Tỷ lệ phụ gia siêu dẻo giảm nước được sử dụng là 1,0% so với khối lượng chất kết dính. Thành phần cấp phối chi tiết của các mẫu vữa được trình bày trong Bảng 3.

Tính công tác của hỗn hợp vữa geopolimer được điều chỉnh để đạt giá trị mục tiêu từ 170mm đến 210mm, tuân theo phương pháp thử tiêu chuẩn TCVN 3121-3:2003. Độ lưu động của vữa được ghi nhận theo thời gian để đánh giá sự suy giảm. Đối với mỗi cấp phối, 3 mẫu thử có kích thước 40mm × 40 mm × 160 mm được chế tạo, bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn cho đến thời điểm thí nghiệm. Cường độ chịu nén của các mẫu này được xác định ở các mốc 7 và 28 ngày tuổi theo tiêu chuẩn TCVN 3121-11:2022.

## 4. Kết quả và thảo luận

### 4.1. Vữa ở trạng thái tươi

Các mẫu vữa đều thỏa mãn độ lưu động mục tiêu  $190 \pm 20$  (mm). Tất cả các mẫu vữa ở trạng thái tươi được tiến hành thí nghiệm suy giảm độ sụt sau mỗi 15 phút cho đến khi tính công tác ổn định. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2, Hình 3 cho thấy hình ảnh thực hiện thí nghiệm.

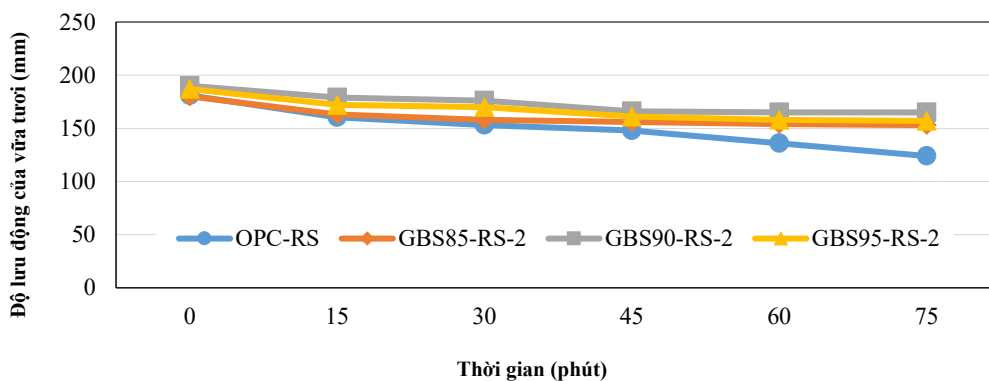
Mẫu vữa chỉ sử dụng xi măng (OPC-RS) có tính công tác bị suy giảm mạnh nhất. Tại lần đo thứ nhất (thời điểm 0 phút), tính công tác đo được là 181mm. Tại lần đo thứ sáu (thời điểm 75 phút), tính công tác chỉ còn 124 mm. Trong khi đó, các mẫu sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn (GBS) kết hợp cùng chất kiềm hoạt hóa (AA) lại có sự suy giảm ít hơn đáng kể và duy trì được tính công tác tốt cho đến 75 phút. Quan sát kết quả trong Hình 2, mẫu vữa sử dụng 90% GBS kết hợp với 10% AA (GBS90-RS-2) có thể duy trì tính công tác tốt nhất với kết quả 190mm tại 0 phút và 165mm tại 75 phút. Thực nghiệm cho thấy GBS sẽ cải thiện tính công tác của vữa geopolimer nhờ bề mặt nhẵn tạo hiệu ứng lăn trên bề mặt (bearing effect), và tốc độ thủy hóa chậm hơn OPC giúp kéo dài thời gian ninh kết [7-9].

**Bảng 3. Thiết kế thành phần cấp phối vữa geopolimer**

Mẫu thí nghiệm <sup>1</sup>	Tỷ lệ thay thế <sup>2</sup> (%)				Khối lượng đơn vị <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )			
	OPC	GBS	AA	W	OPC	GBS	AA	RS
OPC-RS	100	0	0	270	600	0	0	1367
GBS85-RS-2	0	85	15	270	0	510	90	1300
GBS90-RS-2	0	90	10	270	0	540	60	1305
GBS95-RS-2	0	95	5	270	0	570	30	1314

<sup>1</sup>Mẫu thí nghiệm có W/B = 45% được đặt tên theo cấu trúc “vật liệu chất kết dính - cốt liệu sử dụng”. Các mẫu thí nghiệm có sử dụng phụ gia hóa dẻo giảm nước gốc Naphthalene formaldehyde sunfonate với hàm lượng 1% khối lượng chất kết dính.

<sup>2</sup>OPC: Xi măng Portland, GBS: Xi hạt lò cao nghiền mịn S95, AA: Chất kiềm hoạt hóa. 3 W: Nước; RS: Cát sông.



**Hình 2. Kết quả thí nghiệm sự suy giảm độ lưu động của vữa tươi theo thời gian**



**Hình 3. Hình ảnh thí nghiệm sự suy giảm độ lưu động của vữa tươi theo thời gian của các mẫu thí nghiệm: (a) OPC-RS (mẫu đối chứng), (b) GBS85-RS-2, (c) GBS90-RS-2, (d) GBS95-RS-2**

#### 4.2. Vữa ở trạng thái đông rắn

Sau quá trình bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn, cường độ chịu nén của các mẫu vữa được xác định tại hai mốc thời gian là 7 và 28 ngày tuổi, tuân thủ theo tiêu chuẩn TCVN 3121-11:2022. Quy trình thí nghiệm được minh họa trực quan tại Hình 4.

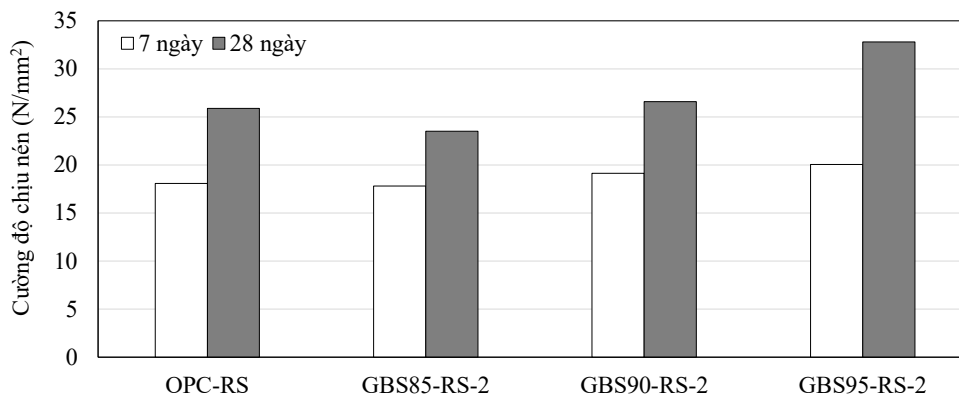
Phạm vi cường độ chịu nén thu được từ thí nghiệm đối với các mẫu vữa geopolimer là từ 17,8N/mm<sup>2</sup> đến 20,1N/mm<sup>2</sup> tại 7 ngày và 23,5N/mm<sup>2</sup> đến 32,8N/mm<sup>2</sup> tại 28 ngày. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của vữa geopolimer được thể hiện trong Hình 5.

Khi so sánh với mẫu đối chứng sử dụng 100% xi măng Portland (OPC), mẫu vữa có chứa 85% xi hạt lò cao nghiền mịn (GBS) và chất kiềm hoạt hóa (AA) 15% trong thành phần chất kết dính có cường độ chịu nén thấp hơn tại 7 ngày và 28 ngày. Tuy nhiên so với mẫu đối chứng, các mẫu vữa có tỷ lệ thay thế xi hạt lò cao nghiền mịn (GBS) 90% và 95% kết hợp với chất kiềm hoạt hóa (AA) ở tỷ lệ thay thế lần lượt là 10%



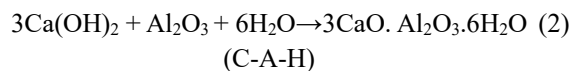
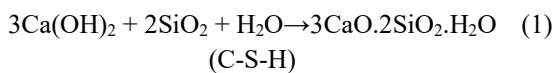
**Hình 4. Thí nghiệm cường độ chịu nén của vữa geopolimer tại 7 ngày và 28 ngày**

và 5% đều có cường độ chịu nén cao hơn. Đặc biệt, mẫu vữa sử dụng 95% xi hạt lò cao nghiền mịn (GBS) kết hợp với 5% chất kiềm hoạt hóa (AA) cho thấy sự tăng trưởng cường độ từ 7 ngày đến 28 ngày vượt trội hơn so với các mẫu còn lại. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra mối tương quan nghịch giữa hàm lượng chất kiềm hoạt hóa và cường độ chịu nén. Cụ thể, việc giảm hàm lượng chất kiềm hoạt hóa dẫn đến sự gia tăng cường độ nén của các mẫu, được quan sát thấy rõ ràng ở cả 2 mốc 7 ngày và 28 ngày tuổi. Nguyên nhân



Hình 5. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén tại 7 ngày và 28 ngày của các mẫu vữa geopolimer

của hiện tượng này là do lượng kiềm hoạt hóa vừa đủ sẽ phản ứng hết với các thành phần khoáng có trong xi hạt lò cao nghiền mịn giúp phát triển các gel C-S-H, C-A-H trong vữa, làm tăng cường độ chịu nén của mẫu thí nghiệm. Đặc biệt, hiện tượng này giúp đẩy mạnh sự phát triển cường độ từ 7 ngày đến 28 ngày, làm tăng cường độ chịu nén của các mẫu thí nghiệm tại tuổi muộn [10]. Cơ chế phản ứng tạo gel C-S-H, C-A-H được thể hiện tại công thức (1) và (2).



Thông qua kết quả thí nghiệm, trong các mẫu vữa geopolimer của nghiên cứu này, hàm lượng chất kiềm hoạt hóa tối ưu là 5%. Ở tỷ lệ này, cường độ chịu nén đạt giá trị tối ưu, đồng thời mức độ tăng cường độ từ 7 ngày đến 28 ngày cũng được ghi nhận là cao nhất. Qua đó, kết quả cho thấy với hàm lượng 5%, chất kiềm hoạt hóa sẽ phản ứng hết với khoáng silic và nhôm có trong GBS giúp quá trình tạo gel cứng diễn ra thuận lợi làm tăng cường độ chịu nén. Đồng thời, môi trường pH vào khoảng 12 trong vữa geopolimer trong trường hợp dư kiềm cũng góp phần tạo môi trường thuận lợi cho quá trình tạo gel.

So sánh với các nghiên cứu khác trên thế giới, khi dùng tro bay, hàm lượng tro bay càng tăng, cường độ chịu nén của vữa geopolimer càng giảm từ 35N/mm<sup>2</sup> đến 20N/mm<sup>2</sup> [11]. Đối với các nghiên cứu sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn trong vữa geopolimer, cường độ chịu nén nằm trong khoảng từ 20N/mm<sup>2</sup> đến 20N/mm<sup>2</sup> [12]. Đặc biệt, đối với các nghiên cứu có kết hợp xi hạt lò cao nghiền mịn và silica fume, cường độ chịu nén tại 28 ngày có thể đạt đến 70N/mm<sup>2</sup> [13].

## 5. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh tính khả thi trong việc phát triển vữa geopolimer thân thiện với môi trường bằng cách sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn (GBS) và một hàm lượng chất kiềm hoạt hóa (AA) tối ưu để thay thế hoàn toàn cho xi măng Portland.

Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng các hỗn hợp vữa geopolimer sử dụng GBS và AA không chỉ giữ được tính công tác tốt mà còn có khả năng duy trì độ lưu động hiệu quả hơn so với vữa xi măng truyền thống. Trong đó, tỷ lệ kết hợp 90% GBS và 10% AA thể hiện khả năng bảo toàn tính công tác tốt nhất theo thời gian, đảm bảo thuận lợi cho quá trình thi công trên thực tế.

Về tính chất cơ học ở trạng thái đã đông rắn, kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ chịu nén của vữa geopolimer có xu hướng tăng lên khi giảm hàm lượng chất kiềm hoạt hóa (AA). Hỗn hợp với 5% AA và 95% GBS đạt cường độ nén cao nhất ở cả hai thời điểm 7 ngày và 28 ngày, đồng thời thể hiện sự phát triển cường độ rất hiệu quả trong giai đoạn này. Điều này khẳng định hiệu quả của việc kiểm soát lượng kiềm hoạt hóa để tối ưu hóa phản ứng tạo gel C-S-H, C-A-H và gia tăng cường độ từ 7 ngày đến 28 ngày đối với vữa geopolimer.

So với cường độ chịu nén của mẫu đối chứng lần lượt tại 7 ngày và 28 ngày, mẫu sử dụng 85% GBS và 15% AA có sự thay đổi là -1,6% và -9,2%. Mẫu sử dụng 90% GBS và 10% AA có sự thay đổi là +5,8% và +2,7%. Mẫu sử dụng 95% GBS và 5% AA có sự thay đổi là +10,9% và +26,7%.

Như vậy, nghiên cứu đã đề xuất được một loại vật liệu thay thế bền vững cho vữa xi măng thông thường, kết hợp được ưu điểm về tính thi công và cơ học khi sử dụng xi hạt lò cao nghiền mịn kết hợp với chất kiềm hoạt hóa. Kết quả mở ra tiềm năng ứng dụng

thực tế trong các công trình xây dựng theo định hướng phát triển xanh và bền vững.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **SV25-26.50**.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] U.S. Geological Survey (2025), *Mineral Commodity Summaries 2025*.
- [2] Song Nie, Jian Zhou, Fan Yang, Mingzhang Lan, Jinmei Li, Zhenqiu Zhang, Zhifeng Chen, Mingfeng Xu, Hui Li, và Jay G Sanjayan (2022), *Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application*, Journal of Cleaner Production, Vol.334, p. 130270.
- [3] Mikalai Filonchyk, Michael P Peterson, Lifeng Zhang, Volha Hurynovich, và Yi He (2024), *Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O*, Science of The Total Environment, Vol. 935, p. 173359.
- [4] Nguyễn Lê Hoàng Thụy Tố Quyên và Nguyễn Văn Đại (2021), *Xếp hạng các công cụ sản xuất tinh gọn: Trường hợp ngành sản xuất thép tại Việt Nam*, Tạp Chí Khoa học Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng, tr.39-48.
- [5] Tạ Văn Luân, Bình Nguyễn Thanh, Thiên Phạm Hữu, và Châm Trịnh Thị (2023), *Nghiên cứu sử dụng xỉ thép làm nguyên liệu sản xuất clanhke xi măng*, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng, Số 13(03), tr. 23.
- [6] (2017), Quyết định ban hành chỉ dẫn kỹ thuật *Xi gang và xỉ thép sử dụng làm vật liệu xây dựng*.
- [7] Yasuhiro Dosho và Thi Phuong Dao (2025), *Research on the application of perfect recycled aggregate concrete for pavement materials*, Transportation Research Procedia, Vol.85, pp.60-67.
- [8] Han-Sol Kim và Han-Seung Lee (2025), *Effect of GGBFS Content and Curing Temperature on Early-Age Strength and Maturity-Based Modeling of Concrete*, Materials, Vol. 18(19), p. 4525.
- [9] Hoàng Minh Đức, Trần Quốc Toán, Lee Sang Hyun, và Do Kwang Soo (2020), *Nghiên cứu ảnh hưởng của xi hạt lò cao nghiền mịn và tro bay đến tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Số 3, tr.33-40.
- [10] Haya H Mhanna, Rami A Hawileh, Jamal A Abdalla, Anas Ayman, Abdulrahman Moussa, Baha El Din Mahdi, và Yousif Kuwatly (2023), *Mechanical properties and durability of GGBS based geopolymer mortar*, Materials Today: Proceedings.
- [11] Hemn Unis Ahmed, Aso A Abdalla, Ahmed S Mohammed, Azad A Mohammed, và Amir Mosavi (2022), *Statistical methods for modeling the compressive strength of geopolymer mortar*, Materials, Vol.15(5), p. 1868.
- [12] Rahmi Karolina, Johannes Tarigan, Harianto Hardjasaputra, and Roy Andre Daniel Silalahi (2023). *Analysis of Geopolymer Mortar Compressive Strength Based on Fly Ash and GGBFS as Patch Repair Material*. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing.
- [13] Tang Van Lam và May Huu Nguyen (2023), *Incorporating industrial By-Products into geopolymer mortar: effects on strength and durability*, Materials, Vol.16(12), p. 4406.

Ngày nhận bài:	29/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	09/03/2026
Ngày duyệt đăng:	16/03/2026