

Nghiên cứu các tính chất cơ lý của hồ và vữa chất kết dính Geopolymer sử dụng tro bay và xỉ lò cao nghiền mịn

**Nguyễn Thị Thu Thủy^{1,2,3*}, Nguyễn Khánh Sơn^{1,2}, Lê Trịnh Huy³, Nguyễn Bùi Duy Hiếu³, Hoàng Nhật Nam³,
Phạm Kim Hiệu³, Trần Thanh Phước³, Lê Thanh Hà³**

¹ Khoa Công nghệ Vật liệu, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM

² Đại Học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh

³ Trường Đại học Giao thông vận tải

TỪ KHOÁ

Chất kết dính geopolymer

Độ dẻo

Thời gian đông kết

Độ xòe

Cường độ

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm các tính chất của chất kết dính (CKD) geopolymer sử dụng chất hoạt hóa natri metasilicate dạng khan kết hợp với tro bay (TB) và xỉ hạt lò cao nghiền mịn (XLC). Natri metasilicate được sử dụng với hàm lượng 15 % CKD, còn TB và XLC có tỷ lệ thay đổi: 30/70, 40/60, 50/50, 60/40 và 70/30. Đồng thời, xi măng PC40 cũng được nghiên cứu để đối chứng. Kết quả cho thấy hồ geopolymer có độ dẻo tiêu chuẩn và thời gian đông kết thấp hơn đáng kể so với hồ xi măng. Vữa geopolymer có độ xòe cao hơn vữa xi măng. Về tính chất cơ học, các cấp phối nhiều xỉ (40TB60XLC và 30TB70XLC) đạt cường độ chịu uốn và nén tương đương hoặc lớn hơn mẫu đối chứng xi măng ở tuổi sớm, trong khi các cấp phối nhiều tro bay (≥ 60 %) cho giá trị thấp hơn ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày. Trong các cấp phối khảo sát, tỷ lệ TB/XLC = 40/60 cho thấy đảm bảo cân bằng giữa tính công tác, cường độ và hiệu quả sử dụng vật liệu.

KEYWORDS

Geopolymer binder

Standard consistency

Setting time

Flow spread

Mechanical strength

ABSTRACT

This paper presents the experimental research results on the properties of geopolymer binders using anhydrous sodium metasilicate as an activator combined with fly ash (FA) and ground granulated blast-furnace slag (GGBFS). Sodium metasilicate was utilized at a dosage of 15 % of the total binder weight, while the FA/GGBFS ratios were varied at 30/70, 40/60, 50/50, 60/40, and 70/30. PC40 cement was also studied as a control sample for comparison. The results indicate that geopolymer pastes exhibit lower standard consistency and significantly shorter setting times compared to cement paste. Furthermore, geopolymer mortar demonstrates higher flowability (spread) than cement mortar. Regarding mechanical properties, slag-rich mixtures (40FA/60GGBFS and 30FA/70GGBFS) achieved flexural and compressive strengths comparable to or exceeding those of the cement control samples at early ages. Conversely, mixtures with higher fly ash content (≥ 60 %) yielded lower strength values at 3, 7, and 28 days. Among the investigated proportions, the FA/GGBFS ratio of 40/60 is considered optimal, ensuring a balance between workability, strength, and material efficiency.

1. Đặt vấn đề

Ngành công nghiệp xây dựng toàn cầu đang đứng trước áp lực lớn về việc giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường, đặc biệt là lượng phát thải khí nhà kính từ quá trình sản xuất vật liệu. Xi măng Poóc lăng, thành phần liên kết chủ chốt trong bê tông truyền thống, là nguồn phát thải CO₂ khổng lồ, ước tính cứ mỗi tấn xi măng sản xuất sẽ thải ra khoảng một tấn CO₂ vào khí quyển [1, 2]. Hiện nay, ngành công nghiệp xi măng chiếm gần 7 % tổng lượng phát thải khí nhà kính toàn cầu. Trong khi đó, nhu cầu sử dụng xi măng không ngừng tăng cao, dự kiến đạt mức 4,7 tỷ tấn vào năm 2020 với tốc độ tăng trưởng 4 % mỗi năm, ước tính đến năm 2026, nhu cầu xi măng sẽ vào khoảng 5,9–6,0 tỷ tấn, dẫn đến sự cạn kiệt nhanh chóng các nguồn tài

nguyên thô không tái tạo [3, 4]. Trước thực trạng này, bê tông geopolymer (hay bê tông chất kết dính kiềm hoạt hóa) đã nổi lên như một giải pháp thay thế bền vững và thân thiện với môi trường. Khác với bê tông truyền thống, geopolymer không phụ thuộc vào xi măng Poóc lăng mà được hình thành từ phản ứng hóa học giữa dung dịch hoạt hóa kiềm và các nguyên liệu giàu aluminosilicate. Quá trình geopolymer hóa bao gồm sự hòa tan các oxit nhôm và silic vô định hình, sau đó là quá trình trùng ngưng để hình thành cấu trúc mạng lưới không gian ba chiều bền vững [3-5].

Việc tận dụng các loại phụ phẩm công nghiệp như tro bay (TB) và xỉ lò cao nghiền mịn (XLC) không chỉ giúp giảm thiểu chi phí xử lý chất thải mà còn tạo ra vật liệu xây dựng có tính chất cơ lý ưu việt. Tro bay, với các hạt hình cầu mịn, giúp cải thiện tính công tác và độ

*Liên hệ tác giả: thuy.nguyen1385@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 22/04/2026, sửa xong ngày 29/04/2026, chấp nhận đăng ngày 04/05/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1334>

đeo của hỗn hợp. Tuy nhiên, geopolymer sử dụng hoàn toàn tro bay thường có nhược điểm là tốc độ đông rắn chậm và cường độ thấp khi bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng. Ngược lại, xi lò cao với hàm lượng CaO cao có khả năng phản ứng thủy lực, giúp đẩy nhanh quá trình ninh kết và phát triển cường độ sớm ngay trong điều kiện nhiệt độ thường. Sự kết hợp giữa tro bay và xi lò cao tạo ra hệ gel hỗn hợp C-(A)-S-H và N-A-S-H, giúp tối ưu hóa cấu trúc vi mô, tăng độ đặc chắc và cải thiện đáng kể cường độ nén của vật liệu [5]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy bê tông geopolymer sử dụng hỗn hợp TB-XLC có thể đạt được cường độ nén cao, dao động từ 50 MPa đến hơn 90 MPa [1], đồng thời sở hữu khả năng chống thấm và độ bền trong môi trường xâm thực vượt trội so với bê tông xi măng truyền thống. Tuy nhiên, tại Việt Nam, mặc dù nguồn phế thải tro xỉ từ các nhà máy nhiệt điện và luyện thép rất dồi dào, việc nghiên cứu và ứng dụng geopolymer cường vẫn còn ở giai đoạn sơ khai và gặp nhiều thách thức về tiêu chuẩn thiết kế cấp phối cũng như dữ liệu về độ bền lâu dài. Ngoài ra, việc sử dụng các loại phụ gia như silica fume hay phụ gia siêu dẻo cũng đóng vai trò quan trọng trong việc tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng và nâng cao tính công tác cho geopolymer [1, 6].

Từ những lý do trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm khảo sát ảnh hưởng của chất hoạt hóa Natri metasilicate và tỉ lệ phối trộn giữa TB/XLC đến các tính chất công tác và cơ lý của chất kết dính geopolymer so sánh với CKD XM PC40 nhằm làm nền tảng cho việc nghiên cứu bê tông geopolymer. Nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa cấp phối để đạt được cường độ cao trong điều kiện bảo dưỡng ngâm nước tự nhiên, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng rộng rãi loại vật liệu "xanh" này trong các công trình hạ tầng tại Việt Nam, góp phần hiện thực hóa mục tiêu phát triển bền vững và kinh tế tuần hoàn.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu

Bảng 1. Thành phần hoá và đặc tính kỹ thuật của XM PC40, XLC và TB.

Thành phần hóa (%)	PC40	XLC	TB
SiO ₂	20,3	35,88	59,5
Al ₂ O ₃	3,51	12,99	24,48
Fe ₂ O ₃	5,05	-	5,74
CaO	62,81	38,13	0,84
MgO	3,02	7,50	1,60
Na ₂ O	-	0,23	0,17
K ₂ O	-	0,78	3,17
L.O.I	1,83	1,00	2,62
Khối lượng riêng (g/cm ³)	3,15	2,83	2,26
Kích thước hạt trung bình (µm)	11,40	0,29	8,26
Tỷ diện tích Blaine (cm ² /g)	3870	5200	3650

L.O.I: Loss on ignition (Mất khi nung)

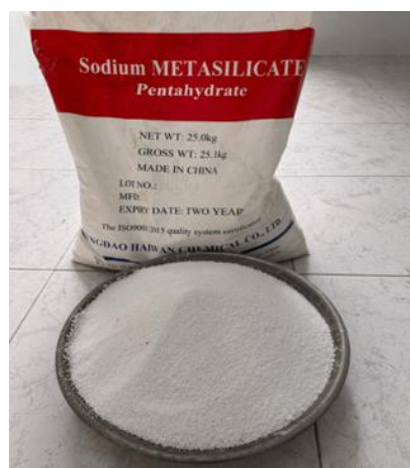
Các nguyên liệu được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm: tro bay (TB) loại F, xi lò cao nghiền mịn (XLC), chất hoạt hóa Natri metasilicate Na₂SiO₃.5H₂O (CHH), cát tiêu chuẩn. Xi măng PC40 Bút Sơn (XM PC40) cũng được sử dụng để so sánh.



Hình 1. Xi lò cao nghiền mịn S95.



Hình 2. Tro bay loại F.



Hình 3. Chất hoạt hóa Na₂SiO₃.5H₂O dạng khan.



Hình 4. Xi măng Bút Sơn PC 40.

2.1.1. Xi lò cao nghiền mịn

Trong nghiên cứu này, xi lò cao dạng hạt nghiền mịn cấp S95 được cung cấp bởi nhà máy Hòa Phát- Hải Dương (Hình 1) đã được lựa chọn làm vật liệu sử dụng. Loại vật liệu này có khối lượng riêng khoảng $2,83 \text{ g/cm}^3$ và tỷ diện Blaine đạt $5200 \text{ cm}^2/\text{g}$, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 11586:2016. Thành phần hóa học cùng các đặc trưng kỹ thuật chi tiết được tổng hợp trong Bảng 1.

2.1.2. Tro bay

Tro bay được sử dụng trong nghiên cứu có nguồn gốc từ nhà máy nhiệt điện Phả Lại (Hình 2) có thành phần hóa học đáp ứng yêu cầu của tro bay loại F theo tiêu chuẩn TCVN 10302-2014, với khối lượng riêng $2,26 \text{ g/cm}^3$. Thành phần hóa học và đặc tính kỹ thuật được trình bày trong Bảng 1.

2.1.3. Chất hoạt hóa

Chất hoạt hóa (CHH) được sử dụng là chất hoạt hóa dạng bột khô, trong đó thành phần hóa học chính là muối Sodium Metasilicate Pentahydrate (Hình 3) kết tinh rắn ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), một số thông số của CHH được cung cấp từ công ty (Bảng 2). Chất hoạt hóa ở dạng khô được hòa tan hoàn toàn với nước theo tỷ lệ cấp phối trước, sau đó mới trộn với tro bay và xi lò cao, giúp quá trình chế tạo hồ, vữa geopolyme trở nên đơn giản, hiệu quả và an toàn; tương tự như chế tạo hồ, vữa xi măng thông thường. Đây là điểm nghiên cứu mới so với những nghiên cứu trước đây thường dùng dung dịch lỏng làm chất hoạt hóa, hòa tan NaOH dạng vảy khô vào nước theo nồng độ yêu cầu, sau đó trộn với dung dịch NaOH và Na_2SiO_3 theo tỷ lệ định trước. Ngoài ra, chất hoạt hóa khô còn có ưu điểm là dễ hòa tan trong nước, tỏa nhiệt, giúp nâng cao hiệu suất phản ứng trùng ngưng, cải thiện cường độ của vữa, bê tông; thuận tiện cho việc đóng gói sẵn hỗn hợp chất kết dính giúp việc thi công, vận chuyển tương tự như vữa xi măng truyền thống.

2.1.4. Xi măng

Xi măng Bút Sơn PC40 (Hình 4) được sử dụng để so sánh với Chất kết dính geopolyme, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 6260:2020. Thành phần hóa học và đặc tính kỹ thuật được trình bày trong Bảng 1.

2.1.5. Nước

Nước được sử dụng để chế tạo vữa Geopolyme là nước sinh hoạt từ nhà máy nước Thủ Đức (Hồ Chí Minh), đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 4506:2012 về nước trộn vữa và bê tông.

2.1.6. Cát tiêu chuẩn

Cát tiêu chuẩn sử dụng trong nghiên cứu từ nguồn Phân Viện Vật liệu xây dựng miền Nam (Hình 5), cát được sản xuất đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 6227:1996.



Hình 5. Cát tiêu chuẩn (SVIBM).

2.2. Thành phần cấp phối hồ geopolimer

Thành phần cấp phối của hồ geopolimer được xây dựng trên cơ sở cấp phối dùng để xác định độ dẻo tiêu chuẩn và thời gian đông kết của hồ xi măng theo quy định trong TCVN 6017:2015. Theo Dong và cộng sự [5], hàm lượng sodium metasilicate tối ưu nằm trong khoảng 10–15 % nhằm đảm bảo quá trình hoạt hóa hiệu quả và đạt cường độ cao. Trong nghiên cứu này, giá trị 15 % được chọn cố định để tối đa hóa mức độ phản ứng và giảm biến số, qua đó làm rõ ảnh hưởng của các yếu tố khác. Tổng chất kết dính (CKD) geopolimer là 500g dùng trong thí nghiệm xác định độ dẻo tiêu chuẩn gồm ba thành phần: chất hoạt hóa (CHH) được giữ cố định ở mức 15 % so với CKD, phần còn lại là tro bay (TB) và xi lò cao (XLC) được phối trộn với tỷ lệ TB/XLC thay đổi tăng dần từ 30 % đến 70 %. Lượng nước được điều chỉnh dần cho đến khi hồ đạt độ dẻo tiêu chuẩn theo độ lún kim lớn. Thành

phần cấp phối của hồ geopolymer và hồ xi măng được trình bày trong Bảng 3.

2.3. Thành phần cấp phối vữa geopolymer

Thành phần cấp phối của vữa Geopolymer được thiết kế dựa

trên cơ sở cấp phối dùng để xác định cường độ xi măng theo quy định trong TCVN 6016:2011. Tổng CKD geopolymer là 450g, với tỷ lệ trộn CKD/Cát tiêu chuẩn = 1/3; N/CKD = 1/2 theo tiêu chuẩn. Thành phần cấp phối của vữa Geopolymer và vữa xi măng được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 2. Các thông số của Chất hoạt hóa Sodium Metasilicate Pentahydrate.

Thông số	Yêu cầu kỹ thuật	Kết quả thử nghiệm
Ngoại quan	–	Dạng hạt màu trắng
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, %	$\geq 99,50$	99,94
Hàm lượng Fe, ppm	≤ 60	37
Khối lượng thể tích xộp, g/cm^3	0,85 – 0,95	0,86
Kích thước hạt, % 1400–425 μm (14–40 mesh)	$\geq 90,00$	99,13
Độ trắng	$\geq 90,00$	92

Bảng 2. Thành phần cấp phối hồ Geopolymer và XM PC40.

Cấp phối	CHH(g)	TB (g)	XLC(g)	XM PC40 (g)
H30TB70XLC	75,0	127,5	297,5	0
H40TB60XLC	75,0	170,0	255,0	0
H50TB50XLC	75,0	212,5	212,5	0
H60TB40XLC	75,0	255,0	170,0	0
H70TB30XLC	75,0	297,5	127,5	0
HXMPC40	0	0	0	500

Bảng 4. Thành phần cấp phối vữa Geopolymer và vữa XP PC40.

Cấp phối	CHH (g)	TB (g)	XLC (g)	XM PC40 (g)	Cát Tiêu chuẩn (g)	Nước (g)
V30TB70XLC	67,5	114,75	267,75	0	1350	225
V40TB60XLC	67,5	153,00	229,50	0	1350	225
V50TB50XLC	67,5	191,25	191,25	0	1350	225
V60TB40XLC	67,5	229,50	153,00	0	1350	225
V70TB30XLC	67,5	267,75	114,75	0	1350	225
VXMPC40	0	0	0	450	1350	225

2.4. Phương pháp nghiên cứu

Đối với mẫu hồ chất kết dính (CKD), thí nghiệm được thực hiện nhằm xác định độ dẻo tiêu chuẩn và thời gian đông kết của hồ geopolymer, đồng thời so sánh với mẫu đối chứng tương ứng theo từng cấp phối. Trước khi chế tạo, các vật liệu được chuẩn bị và cân định lượng theo cấp phối hồ đã tính toán. Quá trình trộn được thực hiện bằng máy trộn tự động (Hình 6). Trước hết, chất hoạt hóa (CHH) được hòa trộn với lượng nước đã định trong khoảng 2–3 phút để đảm bảo hòa tan hoàn toàn. Tiếp theo, hỗn hợp tro bay (TB) và xi lò cao (XLC) được đưa vào cối trộn và tiến hành trộn theo chế độ tự động phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 6017:2015. Hồ sau khi trộn được cho vào vành khâu để xác định độ dẻo tiêu chuẩn; lượng nước được điều

chỉnh qua các lần thử cho đến khi đạt độ lún kim lớn theo yêu cầu. Hồ đạt độ dẻo tiêu chuẩn được sử dụng để xác định thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết của các cấp phối.

Đối với mẫu vữa CKD, thí nghiệm được thực hiện nhằm đánh giá độ xòe và cường độ chịu uốn, nén tại các tuổi 3, 7 và 28 ngày theo TCVN 6016-2011. Trước hết, chất hoạt hóa (CHH) dạng hạt được hòa tan hoàn toàn trong nước đã định lượng ở tốc độ trộn thấp để tạo dung dịch hoạt hóa. Sau đó, chất kết dính gồm tro bay (TB) và xi lò cao (XLC) được đưa vào và trộn trong 30 giây ở tốc độ thấp. Cát tiêu chuẩn tiếp tục được bổ sung từ từ trong 30 giây, sau đó hỗn hợp được trộn thêm 30 giây ở tốc độ cao. Hỗn hợp được nghỉ 90 giây (30 giây đầu vét thành cối, 60 giây sau để yên), rồi trộn lại 60 giây ở tốc độ cao để hoàn tất; tổng thời gian trộn khoảng 5–6 phút, bao gồm cả

thời gian hòa tan CHH. Vữa sau khi trộn được đúc vào khuôn chuẩn kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm (Hình 7), chia làm hai lớp, mỗi lớp đầm 60 lần bằng máy đầm tự động (Hình 7), sau đó làm phẳng bề mặt, dán nhãn và để khô tự nhiên trong 48 giờ. Sau thời gian này, mẫu được tháo khuôn và bảo dưỡng trong nước ở nhiệt độ phòng. Nghiên cứu nhằm so sánh vữa geopolimer với vữa xi măng PC40 đối chứng. Do hiện chưa có tiêu chuẩn riêng cho CKD geopolimer và mẫu geopolimer thường cần khoảng 48 giờ để đạt đủ cường độ tháo khuôn, do đó cả hai loại mẫu vữa geopolimer và mẫu vữa XM PC40 đều được áp dụng cùng chế độ bảo dưỡng để đảm bảo tính so sánh.



Hình 6. Máy trộn hồ, vữa tiêu chuẩn.



Hình 7. Máy đầm mẫu vữa và khuôn đúc mẫu vữa chuẩn.

Công tác chế tạo và thí nghiệm mẫu geopolimer và mẫu xi măng PC40 tuân thủ các yêu cầu của các tiêu chuẩn Việt Nam và được tiến hành nghiên cứu tại phòng thí nghiệm LAS-XD225 thuộc Phân hiệu trường Đại học Giao Thông Vận Tải tại TP. Hồ Chí Minh.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Độ dẻo tiêu chuẩn (Ntc) của hồ CKD geopolimer

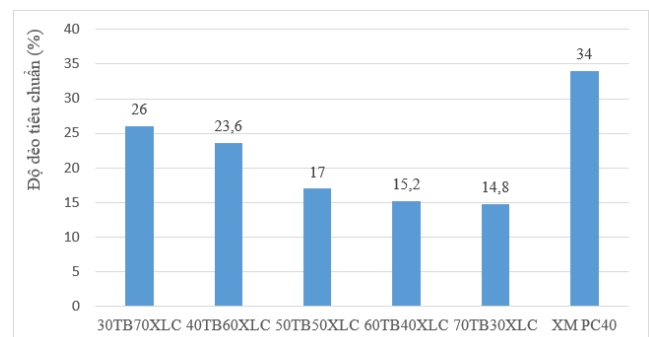
Quy trình xác định độ dẻo tiêu chuẩn của hồ chất kết dính được tiến hành theo TCVN 6017:2015. Lắp lại phép thử với các hồ có lượng nước khác nhau cho tới khi thu được khoảng cách giữa đầu kim to với tấm đế là (6 ± 2) mm, ghi lại hàm lượng nước của hồ này, lấy chính xác đến 0,5 % và coi đó là lượng nước cho độ dẻo tiêu chuẩn. Kết quả thử độ dẻo tiêu chuẩn của mẫu đối chứng hồ XM PC40 và của mẫu hồ geopolimer được minh họa Hình 8, Hình 9 và Hình 10.



Hình 8. Độ lún kim to của mẫu đối chứng hồ XM PC40 đạt độ dẻo tiêu chuẩn.



Hình 9. Dạng vết lún kim to CKD geopolimer đạt độ dẻo tiêu chuẩn.



Hình 10. Độ dẻo tiêu chuẩn của các mẫu hồ geopolimer và mẫu XM PC40.

Kết quả độ dẻo tiêu chuẩn cho thấy xu hướng giảm rõ rệt của nhu cầu nước khi hàm lượng tro bay tăng từ 30 % lên 70 %, trong khi hàm lượng xi lò cao giảm tương ứng. Cụ thể, độ dẻo tiêu chuẩn giảm mạnh từ 26,0 % (TB/XLC=30/70) xuống 14,8 % (TB/XLC=70/30), chứng tỏ các cấp phối giàu tro bay cần ít nước hơn để đạt độ dẻo tiêu chuẩn. Nguyên nhân chủ yếu là do tro bay có dạng hạt cầu, bề mặt nhẵn, tạo hiệu ứng “bi lãn”, giúp giảm ma sát giữa các hạt và cải thiện tính chảy của hồ. Ngược lại, xi lò cao có dạng hạt góc cạnh và hàm lượng canxi cao, dẫn đến phản ứng nhanh tạo gel giàu Ca (C–A–S–H), làm tăng độ nhớt và ứng suất chảy của hệ, từ đó làm tăng nhu cầu nước [7, 8].

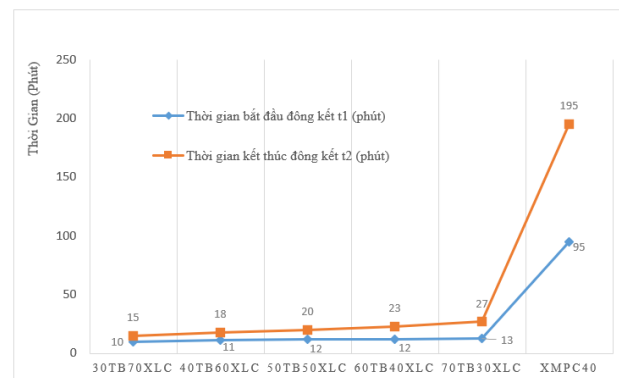
So với mẫu đối chứng xi măng PC40 (độ dẻo tiêu chuẩn = 34,0 %), tất cả các hệ geopolimer đều có nhu cầu nước thấp hơn đáng kể. Điều này xuất phát từ sự khác biệt về cơ chế phản ứng: xi măng Portland thủy hóa tiêu thụ nhiều nước để hình thành các sản phẩm như C–S–H và $\text{Ca}(\text{OH})_2$, trong khi geopolimer chủ yếu trải qua quá trình hòa tan và trùng ngưng các pha aluminosilicate trong môi trường kiềm, trong đó nước đóng vai trò môi trường phản ứng hơn là bị liên kết hóa học [9].

Trong các cấp phối nghiên cứu, tỷ lệ TB/XLC = 40/60 (độ dẻo tiêu chuẩn = 23,6 %) được đánh giá là hợp lý nhất để sử dụng cho các thí nghiệm tiếp theo. Cấp phối này đảm bảo sự cân bằng giữa tính công tác và khả năng phản ứng: vừa đủ độ chảy để thi công, vừa duy trì hàm lượng xi đủ cao để phát triển cường độ sớm. Các cấp phối giàu tro bay tuy có độ dẻo cao hơn nhưng có thể làm chậm quá trình đóng rắn, trong khi cấp phối giàu xi lại yêu cầu nhiều nước hơn và làm giảm tính thi công. Do đó, tỷ lệ 40/60 được lựa chọn là tối ưu cho nghiên cứu tiếp theo.

3.2. Thời gian đông kết của hồ CKD geopolimer



Hình 11. Độ lún kim nhỏ thử thời gian đông kết của mẫu hồ Geopolymer.



Hình 12. Thời gian đông kết của hồ geopolimer theo tỷ lệ TB/XLC và của XMPC40.

Quy trình xác định thời gian đông kết bao gồm thời gian bắt đầu đông kết (t_1) và thời gian kết thúc đông kết (t_2) của hồ chất kết dính được tiến hành theo TCVN 6017:2015. Trộn hồ đạt độ dẻo tiêu chuẩn, thay kim to thành kim nhỏ gắn vào dụng cụ Vicat. Khoảng thời gian trôi qua kể từ thời điểm “không” đến thời điểm khoảng cách giữa đầu kim và mặt trên tấm để đạt (6 ± 3) mm là thời gian bắt đầu đông kết t_1 của mẫu hồ, lấy chính xác đến 5 min; khoảng thời gian trôi qua kể từ thời điểm “không” đến thời điểm kim chỉ lún vào bề mặt mẫu 0,5 mm lần đầu tiên là thời gian kết thúc đông kết t_2 của mẫu hồ, lấy chính xác đến 15 min. Kết quả thử độ dẻo tiêu chuẩn của mẫu đối chứng hồ XM PC40 và của mẫu hồ geopolimer được minh họa Hình 11 và Hình 12.

Kết quả thí nghiệm cho thấy thời gian bắt đầu (t_1) và kết thúc đông kết (t_2) của hồ chất kết dính geopolimer biến thiên trong khoảng 10–13 phút và 15–27 phút, ngắn hơn rất nhiều so với hồ xi măng PC40 ($t_1 = 95$ phút, $t_2 = 195$ phút). Khi tăng hàm lượng TB từ 30 % lên 70 % và giảm tương ứng XLC, cả t_1 và t_2 đều có xu hướng tăng dần, trong đó t_1 tăng nhẹ (10 → 13 phút) còn t_2 tăng rõ rệt hơn (15 → 27 phút). Điều này cho thấy thời gian kết thúc đông kết nhạy hơn với sự thay đổi thành phần. Xu hướng trên được giải thích bởi cơ chế phản ứng của hệ geopolimer: XLC giàu CaO thúc đẩy nhanh quá trình hình thành gel, làm rút ngắn thời gian đông kết, trong khi TB có hoạt tính thấp hơn, cần thời gian dài hơn cho quá trình hòa tan và trùng ngưng, dẫn đến kéo dài thời gian đông kết [4].

So với xi măng PC40, sự khác biệt lớn về thời gian đông kết bắt nguồn từ cơ chế phản ứng: xi măng Portland trải qua quá trình thủy hóa với giai đoạn cảm ứng, trong khi geopolimer hình thành cấu trúc nhanh hơn thông qua phản ứng trùng ngưng trong môi trường kiềm. Do đó, hệ geopolimer có thời gian đông kết ngắn và nhạy với thành phần hơn. Trong các cấp phối khảo sát, tỷ lệ TB/XLC = 40/60 ($t_1 = 11$ phút, $t_2 = 18$ phút) được đánh giá là hợp lý nhất, do đảm bảo cân bằng giữa tính công tác và tốc độ phản ứng. Cấp phối này không đông kết quá nhanh như hệ giàu XLC, thuận lợi cho thi công, đồng thời vẫn đảm bảo phát triển cấu trúc sớm, không bị kéo dài như các hệ giàu TB. Vì vậy, tỷ lệ 40/60 được lựa chọn là tối ưu cho các nghiên cứu

tiếp theo, phù hợp với xu hướng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây.

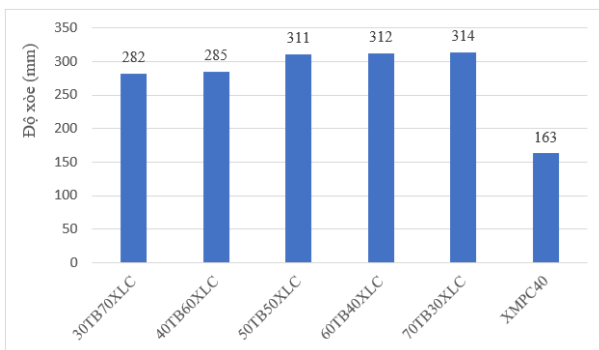
3.3. Độ xòe của hỗn hợp vữa CKD geopolymer



Hình 13. Bàn dần thử độ xòe của hỗn hợp vữa xi măng PC40.



Hình 14. Đo độ xòe của hỗn hợp vữa geopolymer.



Hình 15. Độ xòe của hỗn hợp vữa geopolymer ở những tỷ lệ TB/XLC và vữa XM PC40.

Tính công tác của vữa geopolymer được đánh giá thông qua độ xòe, xác định bằng phương pháp bàn dần theo TCVN 3121-3:2003. Mẫu vữa tiêu chuẩn được chế tạo với tỷ lệ Nước/CKD = 0,5 (tương ứng 225 ml nước và 450 g chất kết dính) và tỷ lệ CKD/Cát tiêu chuẩn = 1/3 (tương ứng 1350 g cát tiêu chuẩn). Kết quả thí nghiệm độ xòe

của mẫu vữa đối chứng xi măng PC40 và mẫu vữa geopolymer được trình bày lần lượt trong Hình 13, Hình 14 và Hình 15.

Kết quả thí nghiệm độ xòe cho thấy vữa geopolymer có khả năng chảy lan cao hơn rõ rệt so với vữa đối chứng xi măng PC40 với cùng một lượng nước trộn 225 ml, với giá trị dao động từ 282–314 mm so với 163 mm của xi măng (giảm gần một nửa so với cấp phối có độ xòe cao nhất 70TB30XLC). Khi tăng hàm lượng TB và giảm XLC, độ xòe có xu hướng tăng dần, tuy nhiên mức tăng không quá đột biến. Xu hướng này phù hợp với kết quả độ dẻo tiêu chuẩn đã trình bày ở trên, cho thấy khi hàm lượng TB tăng thì nhu cầu nước giảm và tính công tác được cải thiện. Nguyên nhân chủ yếu do TB có dạng hạt cầu, giúp giảm ma sát nội và tăng khả năng chảy, trong khi XLC có hoạt tính cao hơn, làm tăng độ nhớt của hệ.

Tuy nhiên, việc tăng độ xòe ở các cấp phối giàu TB ($\geq 50\%$) không mang lại lợi ích đáng kể mà có thể gây bất lợi về độ ổn định của hỗn hợp. Do đó, tỷ lệ TB/XLC = 40/60 (độ xòe = 285 mm) được xem là hợp lý nhất, vì đảm bảo sự cân bằng giữa tính lưu động và độ ổn định, đồng thời phù hợp với xu hướng độ dẻo tiêu chuẩn đã phân tích. Cấp phối này vừa đảm bảo khả năng thi công, vừa hạn chế nguy cơ phân tầng, do đó được lựa chọn cho các nghiên cứu tiếp theo.

3.4. Cường độ kéo uốn của vữa CKD geopolymer

Bảng 5. Cường độ chịu kéo uốn vữa geopolymer và vữa XM PC40.

Cấp phối	Cường độ kéo uốn R_{ku} (MPa)		
	3 ngày	7 ngày	28 ngày
V30TB70XLC	8,5	9,7	10,6
V40TB60XLC	8,2	9,4	10,4
V50TB50XLC	5,8	8,5	9,8
V60TB40XLC	1,3	5,4	7,3
V70TB30XLC	0	1,6	2,5
VXMPC40	8,1	9,2	11,7



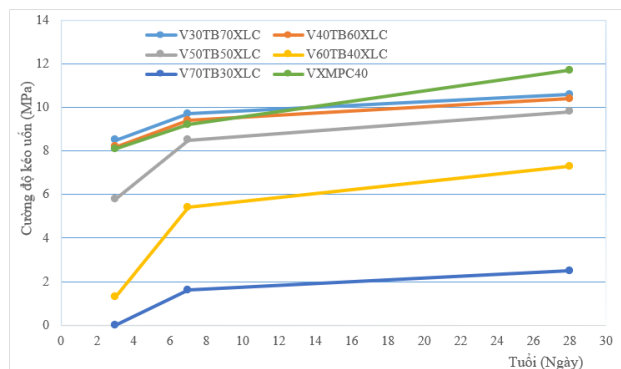
Hình 16. Sau 2 ngày tháo khuôn và bảo dưỡng mẫu vữa geopolymer tự nhiên.



Hình 17. Bảo dưỡng mẫu vữa geopolimer trong nước sau 2 ngày để nhiệt độ phòng.



Hình 18. Thí nghiệm xác định cường độ kéo khi uốn.



Hình 19. Sự phát triển cường độ kéo khi uốn của các cấp phối vữa geopolimer và XMPC40.

Cường độ kéo khi bị uốn được xác định theo TCVN 3121-11:2003: Xác định cường độ uốn và nén của vữa đã đóng rắn. Các tổ hợp mẫu có kích thước 160 x 40 x 40 mm được bảo dưỡng đến 3, 7 và 28 ngày để thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi uốn. Các bước tiến hành và kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi uốn được thể hiện ở Hình 16, Hình 17, Hình 18 và Hình 19.

Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ kéo khi uốn của các mẫu vữa geopolimer sử dụng 15 % Na_2SiO_3 khan tăng theo thời

gian, với các giá trị điển hình như 30TB70XLC tăng từ 8,5 MPa (3 ngày) lên 9,7 MPa (7 ngày) và đạt 10,6 MPa (28 ngày), trong khi 40TB60XLC đạt 8,2; 9,4 và 10,4 MPa tương ứng. Xu hướng này phản ánh quá trình Geopolymerization tiếp tục diễn ra, góp phần làm đặc chắc cấu trúc gel theo thời gian, tuy nhiên tốc độ gia tăng cường độ ở giai đoạn sau có xu hướng chậm lại.

Về ảnh hưởng thành phần, các cấp phối giàu xi lò cao vẫn thể hiện ưu thế rõ rệt. Cụ thể, hai cấp phối 30TB70XLC và 40TB60XLC luôn duy trì cường độ cao nhất ở tất cả các tuổi, trong khi khi tăng hàm lượng tro bay lên 50 % và 60 % thì cường độ giảm đáng kể, chỉ còn 5,8 MPa và 1,3 MPa ở 3 ngày, và đạt 9,8 MPa và 7,3 MPa ở 28 ngày; đặc biệt mẫu 70TB30XLC chỉ đạt 2,5 MPa ở 28 ngày. Điều này cho thấy vai trò quan trọng của xi giàu Ca trong việc thúc đẩy hình thành thành gel C-(A)-S-H, giúp phát triển cường độ nhanh hơn so với hệ giàu tro bay [2, 3].

So sánh với mẫu đối chứng Xi măng Bút Sơn PC40 cho thấy vữa geopolimer có thể đạt cường độ tương đương hoặc cao hơn ở tuổi sớm (8,2–8,5 MPa so với 8,1 MPa ở 3 ngày; 9,4–9,7 MPa so với 9,2 MPa ở 7 ngày). Tuy nhiên, ở 28 ngày, mẫu PC40 đạt 11,7 MPa, cao hơn các cấp phối geopolimer, cho thấy cơ chế thủy hóa tạo C-S-H vẫn mang lại lợi thế về cường độ dài ngày. Bên cạnh đó, chế độ bảo dưỡng 2 ngày đầu trong điều kiện tự nhiên có thể hạn chế sự hòa tan ban đầu của pha hoạt tính, đặc biệt đối với tro bay, dẫn đến cường độ thấp hơn ở các cấp phối giàu tro bay; sau khi ngâm nước, phản ứng được thúc đẩy và cường độ tăng rõ rệt.

Trên cơ sở tổng hợp các kết quả, cấp phối 40TB60XLC được xem là tối ưu do duy trì cường độ cao và ổn định ở cả ba tuổi (8,2; 9,4; 10,4 MPa), đồng thời đảm bảo sự cân bằng hợp lý giữa tro bay và xi, phù hợp cho ứng dụng thực tế.

3.5. Cường độ chịu nén của vữa CKD geopolimer

Cường độ nén của mẫu vữa được xác định theo TCVN 3121-11:2003 về phương pháp xác định cường độ uốn và nén của vữa đã đóng rắn. Sau khi thí nghiệm uốn, mẫu bị phá hoại được tách thành hai nửa và tiếp tục sử dụng để xác định cường độ nén bằng cách thay đổi bộ gá thử phù hợp. Kết quả thí nghiệm cường độ nén được trình bày trong Bảng 6 và Hình 20, Hình 21, Hình 22 và Hình 23.

Bảng 6. Cường độ chịu nén vữa geopolimer và vữa XMPC40.

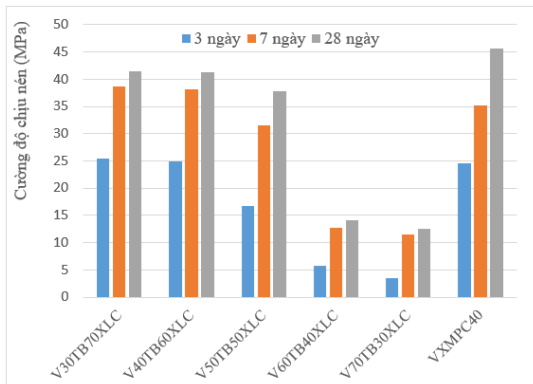
Cấp phối	Cường độ nén (MPa)		
	3 ngày	7 ngày	28 ngày
V30TB70XLC	25,5	38,7	41,5
V40TB60XLC	24,9	38,2	41,2
V50TB50XLC	16,8	31,5	37,8
V60TB40XLC	5,7	12,8	14,2
V70TB30XLC	3,5	11,5	12,6
VXMPC40	24,6	35,2	45,6



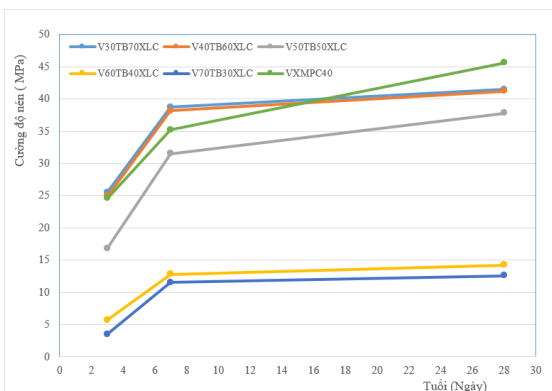
Hình 20. Thử nén mẫu vữa.



Hình 21. Cấu trúc vi mô của vữa XMPC40 và vữa geopolimer sau khi phá hoại.



Hình 22. Cường độ nén ở 3, 7 và 28 ngày tuổi của các cấp phối geopolimer và XMPC40.



Hình 23. Sự phát triển cường độ nén của các cấp phối vữa geopolimer và XMPC40.

Đồ thị cho thấy cường độ nén của các hệ geopolimer tăng theo thời gian, tuy nhiên phụ thuộc mạnh vào tỷ lệ TB/XLC và chế độ dưỡng hộ. Ở tuổi 3 ngày, hai cấp phối giàu xi (V30TB70XLC và V40TB60XLC) đạt khoảng 24,9–25,5 MPa, cao hơn mẫu xi măng PC40 (24,6 MPa), trong khi các cấp phối giàu tro bay thấp hơn đáng kể. Đến 7 ngày, hai cấp phối này đạt 38,2–38,7 MPa, tiếp tục vượt mẫu đối chứng (35,2 MPa), và duy trì xu hướng này ở 28 ngày với cường độ 41,2–41,5 MPa. Tuy nhiên, ở tuổi 28 ngày, cường độ của hai cấp phối này thấp hơn nhẹ so với mẫu xi măng PC40 (45,6 MPa). Điều này cho thấy vai trò của xi lò cao trong việc thúc đẩy phản ứng và hình thành nhanh các sản phẩm gel giàu Ca, giúp phát triển cường độ sớm rõ rệt, nhưng ở tuổi muộn, xi măng vẫn có xu hướng phát triển cường độ cao hơn trong điều kiện dưỡng hộ nước [10, 11].

Đối với cấp phối trung gian V50TB50XLC, cường độ nén đạt 16,8 MPa (3 ngày), 31,5 MPa (7 ngày) và 37,8 MPa (28 ngày), thấp hơn hai cấp phối giàu xi nhưng vẫn duy trì xu hướng phát triển ổn định theo thời gian và tiệm cận giá trị của mẫu xi măng ở tuổi muộn. Điều này cho thấy sự kết hợp cân bằng giữa tro bay và xi lò cao đã cải thiện đáng kể khả năng phát triển cường độ so với các cấp phối giàu tro bay, đồng thời vẫn đảm bảo tiềm năng ứng dụng trong thực tế.

Ngược lại, các cấp phối có hàm lượng tro bay cao (V60TB40XLC và V70TB30XLC) vẫn thể hiện cường độ thấp ở tất cả các tuổi thí nghiệm. Cụ thể, ở 28 ngày, cường độ đạt khoảng 12,6–14,2 MPa, tuy nhiên vẫn thấp hơn rất nhiều so với các cấp phối còn lại. Nguyên nhân không chỉ do phản ứng geopolimer hóa diễn ra chậm mà còn do ảnh hưởng bất lợi của chế độ dưỡng hộ. Với điều kiện 2 ngày đầu dưỡng hộ tự nhiên, sau đó ngâm nước, các mẫu này có hiện tượng mềm hóa rõ rệt và xuất hiện sự rửa trôi kiềm ra môi trường nước, làm suy giảm cấu trúc và giảm mạnh cường độ nén. Hiện tượng này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, cho thấy hệ geopolimer giàu tro bay không ổn định trong môi trường nước ở tuổi sớm do quá trình hòa tan và mất kiềm. Do đó, đối với các cấp phối có tỷ lệ TB cao ($\geq 60\%$), không nên áp dụng chế độ dưỡng hộ ngâm nước sau 2 ngày, mà cần sử dụng dưỡng hộ tự nhiên kín hoặc dưỡng hộ nhiệt để hạn chế hiện tượng rửa trôi và thúc đẩy phản ứng geopolimer hóa, từ đó cải thiện cường độ cơ học [11, 12].

Xét tổng thể, mặc dù cấp phối V30TB70XLC vẫn cho cường độ cao nhất ở tuổi sớm, nhưng ở 28 ngày, sự chênh lệch giữa các cấp phối giàu xi là không đáng kể và đều thấp hơn mẫu xi măng đối chứng. Trong khi đó, cấp phối V40TB60XLC tiếp tục được đánh giá là tối ưu hơn do có cường độ nén tương đương V30TB70XLC ở mọi tuổi, đồng thời đảm bảo tính công tác tốt hơn (độ dẻo tiêu chuẩn và độ xòe tốt hơn) và tăng hàm lượng tro bay sử dụng, giúp hiệu quả về tính kinh tế. Vì vậy, tỷ lệ TB/XLC = 40/60 vẫn được đề xuất là lựa chọn hợp lý, đảm bảo cân bằng giữa cường độ cơ học, tính công tác và hiệu quả kinh tế, mặc dù cường độ 28 ngày thấp hơn nhẹ so với mẫu xi măng PC40 trong điều kiện nghiên cứu.

4. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu chất kết dính geopolymer sử dụng tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn và chất hoạt hóa natri metasilicate dạng khan chiếm 15 % CKD, có thể rút ra các kết luận sau:

- Tỷ lệ TB/XLC ảnh hưởng rõ rệt đến tính công tác của hồ và vữa geopolymer. Khi tăng hàm lượng tro bay, độ dẻo tiêu chuẩn giảm và độ xòe tăng, cho thấy khả năng thi công được cải thiện so với vữa xi măng PC40.

- Thời gian đông kết của hồ geopolymer ngắn hơn đáng kể so với hồ xi măng và tăng dần khi hàm lượng tro bay tăng. Các cấp phối giàu xỉ có xu hướng đông kết nhanh hơn do phản ứng mạnh của pha giàu canxi.

- Cường độ kéo uốn và cường độ nén của vữa geopolymer tăng theo thời gian và phụ thuộc mạnh vào tỷ lệ TB/XLC. Các cấp phối giàu xỉ (30/70 và 40/60) đạt cường độ cao, tương đương hoặc vượt mẫu xi măng ở tuổi sớm (3 và 7 ngày), trong khi các cấp phối giàu tro bay (≥ 60 %) cho cường độ thấp hơn ở tất cả các tuổi thí nghiệm.

- So với vữa xi măng PC40, vữa geopolymer có ưu thế về cường độ sớm nhưng ở tuổi 28 ngày, cường độ nén của xi măng vẫn cao hơn trong điều kiện bảo dưỡng nước.

- Trong các cấp phối khảo sát, tỷ lệ TB/XLC = 40/60 được xác định là tối ưu, đảm bảo sự cân bằng giữa tính công tác, cường độ cơ học và hiệu quả sử dụng vật liệu.

Lời cảm ơn

Tác giả liên hệ xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUT, VNU-HCM) đã hỗ trợ nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. T.-H. Le, T.-C. Dang, and T.-T. T. Nguyen. "High-performance geopolymer concrete: a review of recent developments," *Journal of Science and Transport Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 243–281, Mar.2026. 10.58845/jstt.utt.2026.en.6.1.243-281.
- [2]. M. Lin, G. Chen, Y. Chen, D. Han, R. Su, and J. Wu. "Mechanical properties and microstructure of fly ash and slag-based geopolymer prepared by silica fume-based activator," *Journal of Cleaner Production*, vol. 498, no. pp. 145214, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145214>.
- [3]. T. Wang, X. Fan, and C. Gao. "Development of high-strength geopolymer mortar based on fly ash-slag: Correlational analysis of microstructural and mechanical properties and environmental assessment," *Construction and Building Materials*, vol. 441, no. pp. 137515, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137515>.
- [4]. S. Samantasinghar and s. p. Singh. "Fresh and Hardened Properties of Fly Ash-Slag Blended Geopolymer Paste and Mortar," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 13, no. pp. 2019. 10.1186/s40069-019-0360-1.
- [5]. M. Dong, M. Elchalakani, and A. Karrech. "Development of high strength one-part geopolymer mortar using sodium metasilicate," *Construction and*

- Building Materials*, vol. 236, no. pp. 117611, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117611>.
- [6]. L. Hà, Đ. Chi, and N. Thủy. "Nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia siêu dẻo đến tính chất của vữa Geopolyme sử dụng tro bay và xỉ lò cao," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, vol. 15, no. pp. 2025. 10.54772/jomc.02.2025.837.
- [7]. A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5 ed. Harlow, UK: Pearson Education, 2011.
- [8]. P. Nath and P. Sarker. "Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete," *Procedia Engineering*, vol. 14, no. pp. 1149-1156, 2011. 10.1016/j.proeng.2011.07.144.
- [9]. J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 4 ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2015.
- [10]. N. Cao, Q. Nguyễn, H. Bùi, and V. Trần. "Nghiên cứu ảnh hưởng của thành phần chất kết dính và hàm lượng kiềm đến cường độ của vữa kiềm hoạt hóa," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, vol. 14, no. pp. 2024. 10.54772/jomc.05.2024.695.
- [11]. T. Lam and N. Trinh. "Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và xỉ lò cao hoạt tính đến tính chất của bê tông cường độ cao hạt mịn không sử dụng chất kết dính xi măng," vol. 12, no. pp. 11-20, 2022.
- [12]. P. Nath and P. K. Sarker. "Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition," *Construction and Building Materials*, vol. 66, no. pp. 163-171, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>.