

Nghiên cứu chế tạo vữa Geopolymer thân thiện môi trường từ tro bay và xỉ lò cao nghiền mịn

Study on the fabrication of eco-friendly Geopolymer mortar from fly ash and ground granulated blast-furnace slag

> THS NGUYỄN QUỐC TRÚC, TS TRẦN HỮU BẰNG*

Trường Đại học Thủ Dầu Một

*Email: bangth@tdmu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu trình bày kết quả thực nghiệm về tính công tác và tính chất cơ lý của vữa geopolymer thân thiện môi trường trên nền tro bay (TB) Vĩnh Tân và xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS) Hòa Phát. Chất hoạt hóa sử dụng là sodium metasilicate pentahydrate dạng bột khô với hàm lượng cố định 15% theo khối lượng chất kết dính. Năm cấp phối vữa với tỷ lệ TB/GGBFS thay đổi từ 25/75 đến 75/25 được chế tạo ở nhiệt độ phòng và so sánh trực tiếp với vữa xi măng đối chứng PCB40. Kết quả cho thấy vữa geopolymer có độ chảy xê vượt trội (185 - 245 mm) so với PCB40 (142 mm). Ở tuổi sớm (3 và 7 ngày), các cấp phối giàu xỉ (25/75 và 35/65) phát triển cường độ nhanh, đạt cường độ nén 7 ngày từ 36,29 đến 36,78 MPa (vượt PCB40 từ 16,3% đến 17,9%) và cường độ uốn 28 ngày đạt cực đại (7,68 - 7,85 MPa). Tuy nhiên, khi hàm lượng TB vượt quá 50%, cường độ chịu lực sụt giảm mạnh do tốc độ phản ứng của TB chậm ở nhiệt độ phòng. Vùng tỷ lệ TB/GGBFS từ 25/75 đến 35/65 được xác định là giải pháp công nghệ tối ưu cho hệ vật liệu này.

Từ khóa: Geopolymer; tro bay Vĩnh Tân; xỉ lò cao Hòa Phát; cường độ chịu nén; vật liệu xanh.

ABSTRACT

This study presents experimental results on the workability and mechanical properties of eco-friendly geopolymer mortar based on Vinh Tan fly ash (FA) and Hoa Phat ground granulated blast-furnace slag (GGBFS). Dry powder sodium metasilicate pentahydrate was used as the alkaline activator with a fixed content of 15% by weight of the binder. Five mortar mixtures with FA/GGBFS ratios varying from 25/75 to 75/25 were fabricated at room temperature and directly compared with a control PCB40 cement mortar. The results indicated that the geopolymer mortars exhibited superior flowability, with flow diameters ranging from 185 to 245 mm compared to 142 mm for the PCB40 control. At early ages (3 and 7 days), the slag-rich mixtures (25/75 and 35/65) developed strength rapidly, achieving 7-day compressive strengths of 36.29 - 36.78 MPa (outperforming PCB40 by 16.3% to 17.9%), while their 28-day flexural strengths reached peak values of 7.68 - 7.85 MPa. However, when the FA content exceeded 50%, the mechanical strength significantly degraded due to the slow reaction rate of FA at ambient temperature. The FA/GGBFS ratio range of 25/75 to 35/65 was determined as the optimal technological solution for this material system.

Keywords: Geopolymer; Vinh Tan fly ash; Hoa Phat GGBFS; compressive strength; green materials.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành công nghiệp xây dựng toàn cầu hiện đang đối mặt với những áp lực cấp bách trong việc thực hiện lộ trình dịch chuyển carbon thấp nhằm đạt mục tiêu "Net Zero" vào năm 2050. Trong đó, quá trình sản xuất xi măng Poóc-lăng truyền thống (OPC) - chất kết dính chủ đạo trong bê tông - được xác định là nguồn phát thải khí nhà kính lớn, chiếm khoảng 7% tổng lượng CO₂ toàn cầu. Theo báo cáo tiến độ mới nhất của Hiệp hội Xi măng và Bê tông Toàn cầu (GCCA), hai phần ba (2/3) lượng CO₂ giải phóng từ quá trình này bắt nguồn từ phản ứng phân hủy nhiệt của đá vôi (quá trình nung vôi - calcination), khiến việc cắt giảm phát thải bằng các phương pháp tối ưu hóa năng lượng thông thường đạt tới giới hạn. Mặc dù các

giải pháp như thu hồi và lưu trữ carbon (CCUS) đang bước đầu được triển khai ở quy mô công nghiệp tại một số quốc gia phát triển từ năm 2025, chi phí đầu tư và hạ tầng kỹ thuật của công nghệ này vẫn là rào cản lớn đối với các nền kinh tế đang phát triển [1].

Mặc dù vậy, khối lượng khai thác liên tục ở quy mô lớn này vẫn đang thúc đẩy sự cạn kiệt nhanh chóng các nguồn tài nguyên khoáng sản thô không tái tạo, đặt ra bài toán cấp bách về việc giảm tỷ lệ clinker trong chất kết dính. Trước thực trạng đó, vật liệu geopolymer (hay chất kết dính kiềm hoạt hóa) nổi lên như một giải pháp công nghệ cốt lõi định hướng phát triển bền vững. Khác với hệ nền bê tông truyền thống, geopolymer loại bỏ hoàn toàn sự phụ thuộc vào xi măng Poóc-lăng. Thay vào đó, cường độ liên kết được

kiến tạo thông qua phản ứng hóa học giữa các tiền chất giàu aluminosilicate và dung dịch kích hoạt kiềm mạnh. Cơ chế của quá trình geopolymer hóa (geopolymerization) diễn ra theo chuỗi chuyển hóa từ sự hòa tan cấu trúc vô định hình của oxit silic (SiO_2) và nhôm (Al_2O_3), tiếp nối bằng sự khuếch tán oligomer và kết thúc bằng pha trùng ngưng tạo dựng cấu trúc mạng lưới không gian ba chiều bền vững [2, 3].

Việc tái sử dụng các phụ phẩm công nghiệp như TB và xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) không chỉ tối ưu hóa chi phí xử lý chất thải mà còn mang lại cho vật liệu mới những đặc tính cơ lý vượt trội. TB, nhờ cấu trúc hình học dạng hạt cầu mịn, đóng vai trò gia tăng độ linh động và tính công tác của hỗn hợp tươi. Tuy nhiên, hệ geopolymer nền 100% TB thường bộc lộ hạn chế về tốc độ đóng rắn chậm và sự chậm phát triển cường độ trong điều kiện bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng. Ngược lại, xỉ lò cao sở hữu hàm lượng oxit canxi (CaO) cao, tạo khả năng phản ứng thủy lực nội tại mạnh mẽ, giúp rút ngắn thời gian ninh kết và thúc đẩy sự phát triển cường độ sớm tại nhiệt độ thường. Sự kết hợp tương hỗ giữa TB và GGBFS dẫn đến sự hình thành đồng thời của hệ gel phức hợp C - (A) - S - H và N - A - S - H [3]. Sự tương tác này giúp hoàn thiện cấu trúc vi mô, giảm độ rỗng xốp và tăng cường đáng kể độ bền nén của vật liệu. Các kết quả thực nghiệm gần đây chỉ ra rằng bê tông geopolymer sử dụng hệ nền phối trộn TB + GGBFS có thể đạt cường độ nén cao, dao động từ 50 MPa đến trên 90 MPa [1], đồng thời thể hiện khả năng kháng xâm thực và chống thấm vượt trội so với bê tông sử dụng xi măng truyền thống.

Tại Việt Nam, dù nguồn tro xỉ từ các nhà máy nhiệt điện và luyện kim nội địa vô cùng dồi dào, việc nghiên cứu và ứng dụng geopolymer cường độ cao vẫn đang ở giai đoạn sơ khởi. Tiến trình triển khai thực tế hiện đang đối mặt với nhiều rào cản kỹ thuật lớn do thiếu hệ thống tiêu chuẩn thiết kế cấp phối chính thức cũng như sự khan hiếm dữ liệu thực nghiệm về độ bền lâu dài (durability). Bên cạnh đó, vai trò của các tác nhân tinh chỉnh cấu trúc như silica fume hay phụ gia siêu dẻo thế hệ mới cũng vô cùng quan trọng nhằm kiểm soát tính công tác và kiến trúc lỗ rỗng của hệ chất kết dính kiểm hoạt hóa này [1, 4].

Xuất phát từ khoảng trống nghiên cứu đó, bài báo khảo sát định lượng ảnh hưởng của chất kích hoạt Natri metasilicate (Na_2SiO_3) và tỷ lệ phối trộn TB/GGBFS đến các đặc tính công tác và cơ lý của hệ chất kết dính geopolymer trong sự đối sánh với xi măng PBC40. Nghiên cứu tập trung tối ưu hóa cấp phối nhằm đạt cường độ cao dưới điều kiện bảo dưỡng thủy hóa tự nhiên, cung cấp cơ sở dữ liệu thực nghiệm tin cậy cho lộ trình thương mại hóa vật liệu xanh tại Việt Nam.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu thí nghiệm

2.1.1. Xi măng (PCB40)

Đến từ thương hiệu Fico và được sản xuất nội địa, dòng xi măng Poóc-lăng hỗn hợp này hoàn toàn đáp ứng tiêu chuẩn TCVN 6260:2020, đồng thời sở hữu các chứng nhận quản lý quốc tế bao gồm ISO 9001:2015 và ISO 14001:2015. Việc đạt dấu chứng nhận CE (CE Marking) cũng mở đường cho sản phẩm xuất khẩu sang thị trường châu Âu, minh chứng cho sự đáp ứng khắt khe các quy định về chất lượng và an toàn của EU. Được gọi là dòng vật liệu thân thiện với môi trường (Eco cement), PCB40 Fico hỗ trợ cắt giảm phát thải và thúc đẩy xu hướng kiến trúc xanh bền vững hiện nay. Về đặc tính vật lý, loại xi măng này có khối lượng riêng đạt 3,15 g/cm³.

2.1.2. Tro bay

Được triển khai thí nghiệm tại Phân viện Vật liệu Xây dựng Miền Nam dưới mã số 2671/SVIBM/PTH (cấp ngày 07/02/2025). Nguồn TB

(TB) sử dụng trong nghiên cứu được thu thập từ Nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân 1. Loại phụ gia này có thành phần hóa học tương tự như TB Vũng Áng, nổi bật với tổng hàm lượng $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ đạt tới 87,48%, vượt trội so với nhiều nguồn cung khác. Mặt khác, các chỉ số SO_3 (0,26%), CaO (1,5%) và mất khi nung - MKN (2,36%) đều duy trì ở mức thấp, giúp hạn chế rủi ro ăn mòn và tối ưu hóa cường độ cơ học của vật liệu. Theo tiêu chuẩn TCVN 10302:2014, đây là TB loại F đủ điều kiện phối trộn trực tiếp vào vữa và bê tông mà không cần qua công đoạn xử lý sơ bộ. Đặc tính ưu việt này mở ra triển vọng ứng dụng lớn trong chế tạo vữa xi măng thân thiện môi trường.

2.1.3. Xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS)

Nghiên cứu này sử dụng xỉ hạt lò cao nghiền mịn dòng S95 do Công ty Cổ phần Thép Hòa Phát cung cấp. Đây là nguồn phế thải công nghiệp từ quá trình luyện kim, được nghiền mịn đạt độ mịn cao với diện tích bề mặt riêng (Blaine) đạt giá trị lớn hơn 5.000 cm²/g và khối lượng riêng đạt 2,8 g/cm³. Sản phẩm hoàn toàn đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 11586:2016 đối với phụ gia khoáng hoạt tính cho bê tông và vữa. Với hàm lượng oxit canxi (CaO) và dioxit silic (SiO_2) tối ưu, GGBFS Hòa Phát đóng vai trò là nguồn cung cấp hạt mịn giàu hoạt tính, kích thích phản ứng thủy hóa tạo gel C-A-S-H đặc chắc, từ đó cải thiện đáng kể cấu trúc vi mô và cường độ tuổi sớm cho hệ chất kết dính geopolymer.

2.1.4. Chất hoạt hóa (CHH)

Các thông số lý - hóa định danh của chất hoạt hóa Sodium Metasilicate Pentahydrate ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sử dụng trong nghiên cứu được tổng hợp tại Bảng 1. Kết quả phân tích cho thấy các chỉ tiêu kỹ thuật hoàn toàn đáp ứng yêu cầu đối với hóa chất công nghiệp loại I theo tiêu chuẩn tham chiếu HG/T 2568 (theo nhà cung cấp). Trong đó, độ tinh khiết của hợp chất đạt tới 99,93% (vượt mức quy định $\geq 99,50\%$) và hàm lượng tạp chất sắt (Fe) duy trì ở mức thấp (39 ppm), đảm bảo tính ổn định và không gây ảnh hưởng tiêu cực đến quá trình hình thành cấu trúc geopolymer.

Bảng 1. Thông số của CHH Sodium Metasilicate Pentahydrate

Thông số	Yêu cầu kỹ thuật	Kết quả thử nghiệm
Ngoại quan	—	Dạng hạt màu trắng
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, %	$\geq 99,50$	99,93
Hàm lượng Fe, ppm	≤ 60	39
Khối lượng thể tích xốp, g/cm ³	0,85 - 0,95	0,87
Kích thước hạt, % 1.400 - 425 μm (14 - 40 mesh)	$\geq 90,00$	99,16
Độ trắng	$\geq 90,00$	95

2.1.5. Cát

Để chế tạo các mẫu vữa geopolymer, nghiên cứu đã lựa chọn nguồn cát tiêu chuẩn từ Phân viện Vật liệu Xây dựng Miền Nam, đáp ứng các chỉ tiêu kỹ thuật quy định trong TCVN 6227:1996 và bảo đảm tính đồng nhất cho các thí nghiệm cơ lý.

2.1.6. Nước

Để đảm bảo tính đồng nhất cho hỗn hợp vữa geopolymer, nghiên cứu sử dụng nước cấp sinh hoạt từ Nhà máy nước Thủ Dầu Một, TP.HCM. Các đặc tính lý - hóa của nguồn nước này đáp ứng nghiêm ngặt yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 4506:2012 và bảo đảm không chứa các tạp chất ảnh hưởng đến quá trình đông kết của vật liệu.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Thành phần cấp phối vữa geopolymer

Vữa geopolymer được thiết kế dựa trên quy định xác định cường độ xi măng trong TCVN 6016:2011. Cụ thể, tổng khối lượng CKD geopolymer sử dụng là 450g, tuân thủ nghiêm ngặt tỷ lệ trộn CKD/Cát tiêu chuẩn = 1/3 và N/CKD = 1/2. Chi tiết về các thành phần

phối trộn của cả vữa geopolimer và vữa xi măng đối chứng được tổng hợp cụ thể trong Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần cấp phối vữa Geopolymer và vữa PCB40

Cấp phối vữa	CHH (g)	TB (g)	GGBFS (g)	PCB40 (g)	Cát (g)	Nước (g)
25TB/75GGBFS	67,5	95,63	286,87	0	1.350	225
35TB/65GGBFS	67,5	133,88	248,62	0	1.350	225
50TB/50GGBFS	67,5	191,25	191,25	0	1.350	225
65TB/35GGBFS	67,5	248,62	133,88	0	1.350	225
75TB/25GGBFS	67,5	286,87	95,63	0	1.350	225
PCB40	0	0	0	450	1.350	225

2.2.2. Phương pháp nghiên cứu

Để đánh giá cơ lý tính (độ chảy xòe, cường độ uốn và nén) theo TCVN 6016:2011 tại các mốc 3, 7, 28 ngày, quy trình chế tạo mẫu vữa được thực hiện nghiêm ngặt qua hai giai đoạn trộn và đúc. Giai đoạn trộn bắt đầu bằng việc hòa tan hoàn toàn CKH hạt vào nước ở tốc độ thấp. Sau đó, các thành phần rắn gồm TB và GGBFS được đưa vào cối trộn trong 30 giây (tốc độ thấp), tiếp tục thêm cát tiêu chuẩn ở 30 giây tiếp theo, rồi chuyển sang tốc độ cao trong 30 giây. Hỗn hợp có 90 giây nghỉ (vết thành cối ở 30 giây đầu) và kết thúc bằng việc đảo đều 60 giây ở tốc độ cao.

Vữa đạt độ đồng nhất sẽ được tạo hình trong khuôn dầm tiêu chuẩn. Công tác đầm chặt được thực hiện qua hai lớp bằng máy dầm tự động với 60 lần đầm mỗi lớp (Hình 1). Sau khi làm phẳng bề mặt và ghi nhãn, các mẫu thử được dưỡng hộ tự nhiên trong 48 giờ. Do đặc tính đông kết chậm của geopolimer ở giai đoạn đầu (cần 48 giờ để tháo khuôn) và sự thiếu hụt tiêu chuẩn riêng biệt cho loại chất kết dính này, hệ mẫu đối chứng xi măng PCB40 cũng được áp dụng quy trình đúc và bảo dưỡng nước tương tự để phục vụ công tác đối sánh dữ liệu.



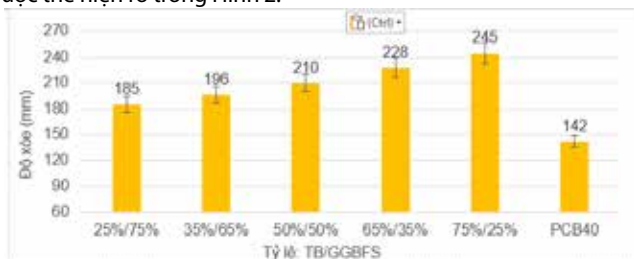
Hình 1. Máy trộn vữa và khuôn đúc mẫu vữa geopolimer



3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ chảy xòe của hỗn hợp vữa geopolimer

Độ chảy xòe đo bằng bàn dầm theo TCVN 3121-3:2003 được sử dụng làm chỉ số đánh giá tính công tác của vữa geopolimer. Hỗn hợp thử nghiệm được thiết lập với hàm lượng nước và chất kết dính lần lượt là 225 ml và 450 g (tỷ lệ Nước/CKD = 0,5), kết hợp cùng 1.350 g cát tiêu chuẩn (tỷ lệ CKD/Cát = 1/3). Dữ liệu thực nghiệm về độ chảy xòe của dòng vữa geopolimer này so với mẫu xi măng PCB40 đối chứng được thể hiện rõ trong Hình 2.



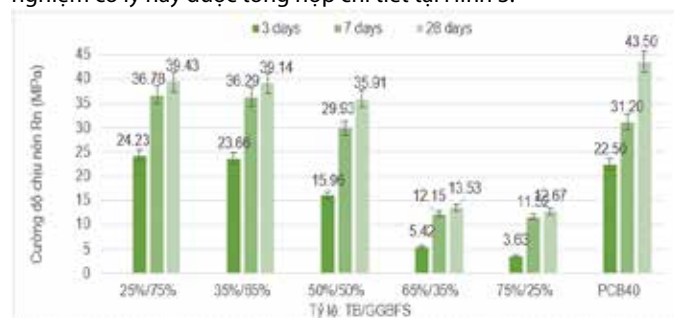
Hình 2. Độ chảy xòe của hỗn hợp vữa geopolimer và PCB40

Số liệu tại Hình 2 cho thấy tất cả các cấp phối vữa geopolimer đều sở hữu độ chảy xòe vượt trội (185 mm - 245 mm) so với mẫu đối chứng xi măng PCB40 (142 mm) ở cùng tỷ số N/CKD = 0,5. Sự gia tăng mạnh mẽ này do Sodium Metasilicate Pentahydrate khi thủy phân giải phóng lượng lớn ion kiềm và silicat hòa tan, đóng vai trò như chất siêu hóa dẻo tự nhiên làm giảm đáng kể sức căng bề mặt pha lỏng và bôi trơn hệ thống hạt hiệu quả hơn clinker xi măng.

Khi hàm lượng TB tăng từ 25% (25TB/75GGBFS) lên 75% (75TB/25GGBFS), độ xòe tăng tuyến tính từ 185 mm chạm mức 245 mm (hướng tới đặc tính tự chảy). Diễn biến này do cấu trúc hạt hình cầu nhẵn của TB tạo "hiệu ứng bi lăn" làm giảm ma sát nội tối đa. Ngược lại, việc tăng tỷ lệ xỉ hạt lò cao (65% và 75%) khiến độ xòe giảm nhẹ do hạt xỉ Hòa Phát góc cạnh, nhám và hấp phụ nước cao hơn. Dù vậy, các cấp phối giàu xỉ vẫn duy trì độ dẻo cao, liên kết tốt và không bị tách nước, rất thuận lợi cho công tác bơm hoặc rót khuôn.

3.2. Cường độ nén của vữa geopolimer

Cường độ chịu nén của vữa đã đóng rắn được xác định tuân thủ tiêu chuẩn TCVN 3121-11:2022. Sau khi kết thúc thử nghiệm uốn, hai nửa mẫu dầm bị phá hoại tiếp tục được tận dụng để đo cường độ nén thông qua hệ thống đồ gá chuyên dụng. Kết quả thực nghiệm cơ lý này được tổng hợp chi tiết tại Hình 3.



Hình 3. Cường độ nén vữa geopolimer và PCB40

* **Nhận xét:** Số liệu từ biểu đồ cho thấy tỷ lệ tổ hợp TB/GGBFS quyết định trực tiếp đến tiến trình phát triển cường độ chịu nén (R_n) của vữa:

- Vượt trội ở tuổi sớm (3 và 7 ngày tuổi): Các cấp phối giàu xỉ (25%/75% và 35%/65%) có tốc độ đóng rắn rất nhanh. Ở 7 ngày tuổi, mẫu 25%/75% đạt 36,78 MPa và mẫu 35%/65% đạt 36,29 MPa, cao hơn đối chứng PCB40 (31,20 MPa) từ 16,3% đến 17,9%. Sự tăng trưởng sớm này do hàm lượng CaO dồi dào trong xỉ tạo ra hệ gel C-A-S-H đan xen mạng lưới geopolimer, giúp vi cấu trúc đặc chắc nhanh ngay ở nhiệt độ phòng thí nghiệm.

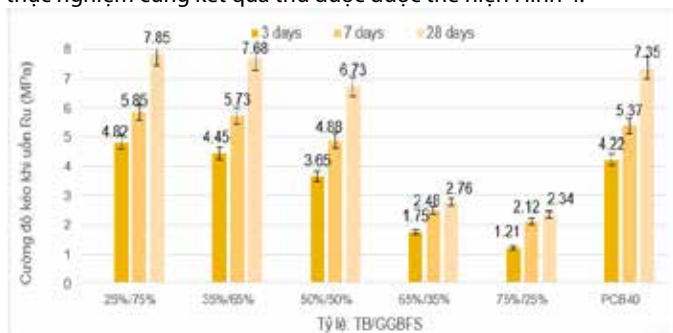
- Chững lại ở tuổi muộn (28 ngày): Ở mốc 28 ngày tuổi, mẫu PCB40 đạt cường độ cao nhất (43,50 MPa), cao hơn hai mẫu giàu xỉ trên (khoảng 39,43 MPa khoảng 10,30%). Điều này cho thấy hệ xi măng truyền thống có đà phát triển cường độ muộn bền bỉ hơn do tiến trình thủy hóa chậm của clinker.

- Sụt giảm mạnh khi tăng TB: Khi lượng TB vượt quá 50% (cấp phối 65/35 và 75/25), cường độ chịu nén sụt giảm nghiêm trọng. Ở tuổi 28 ngày, mẫu 75%/25% chỉ đạt 12,67 MPa, giảm đến 67,9% so với mẫu 25%/75%. Nguyên nhân do các liên kết trong hạt TB Vĩnh Tân rất bền, phản ứng chậm ở nhiệt độ phòng. Khi cắt giảm lượng xỉ, hệ thống bị thiếu hụt Ca^{2+} và nguồn sinh nhiệt, khiến lượng gel liên kết hình thành nghèo nàn, làm cấu trúc vữa bị xốp và giảm khả năng chịu lực.

- Tỷ lệ tổ hợp vùng 25%/75% đến 35%/65% là lựa chọn tối ưu nhất cho hệ vữa này, vừa đảm bảo tính công tác tốt vừa cho cường độ sớm vượt trội xi măng PCB40 đối chứng.

3.3. Cường độ chịu kéo khi uốn của vữa geopolimer

Cường độ chịu uốn của vữa được xác định tuân thủ tiêu chuẩn TCVN 3121-11:2022. Các tổ mẫu đầm kích thước (40x40x160)mm sau khi bảo dưỡng đến các ngày tuổi 3, 7 và 28 sẽ được đưa vào máy thử nghiệm nhằm đánh giá khả năng chịu lực. Quy trình triển khai thực nghiệm cùng kết quả thu được được thể hiện Hình 4.



Hình 4. Cường độ chịu kéo khi uốn vữa geopolimer và PCB40

* **Nhận xét:** Biểu đồ ở Hình 4 cho thấy tỷ lệ TB/GGBFS ảnh hưởng rõ rệt đến cường độ chịu uốn (R_u) của vữa ở các ngày tuổi:

- Các cấp phối giàu xỉ (25%/75% và 35%/65%): Cho khả năng chịu uốn vượt trội so với mẫu đối chứng PCB40 ở mọi mốc kiểm tra. Tại mốc 28 ngày, mẫu 25%/75% đạt giá trị cực đại là 7,85 MPa (cao hơn PCB40 khoảng 6,8%). Sự gia tăng này do lượng CaO dồi dào từ xỉ thúc đẩy hình thành đồng thời hệ gel liên hợp C-A-S-H và N-A-S-H, giúp nâng cao độ đặc chắc và lực liên kết dính bám với cát tiêu chuẩn.

- Các cấp phối giàu TB (hàm lượng TB > 50%): Cường độ chịu uốn sụt giảm nghiêm trọng. Ở mốc 28 ngày, khi tăng TB từ 50% lên 65%, cường độ uốn giảm đột ngột đến 59% (từ 6,73 MPa xuống 2,76 MPa); mẫu 75%/25% đạt mức thấp nhất là 2,34 MPa. Nguyên nhân do TB Vĩnh Tân phản ứng kém ở nhiệt độ phòng thí nghiệm. Khi lượng xỉ giảm sâu, hệ thống bị thiếu hụt canxi và nguồn sinh nhiệt, khiến TB tồn tại như cốt liệu trơ xốp, tạo ra nhiều vết nứt vi mô và làm giảm khả năng truyền ứng suất kéo của ma trận vữa.

- Vùng tỷ lệ từ 25%/75% đến 35%/65% là giải pháp công nghệ tối ưu, giúp vữa geopolimer đạt độ dai cơ học và khả năng chống nứt vượt trội hơn hẳn xi măng thương mại PCB40.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm, một số kết luận chính được rút ra như sau:

- Về tính công tác: Vữa geopolimer đạt độ linh động cao với độ chảy xòe dao động từ 185 mm đến 245 mm, vượt trội so với vữa xi măng PCB40 (142 mm). Độ xòe tăng tuyến tính theo hàm lượng TB nhờ hình thái hạt hình cầu nhẵn tạo hiệu ứng bôi trơn hệ thống.

- Về tính chất cơ lý: Tỷ lệ tổ hợp TB/GGBFS quyết định tiến trình phát triển cường độ của vữa. Nhóm cấp phối giàu xỉ (25/75 và 35/65) thể hiện ưu thế vượt trội ở tuổi sớm nhờ lượng CaO dồi dào tạo hệ gel đặc chắc C-A-S-H đan xen mạng geopolimer. Tại mốc 7 ngày, cường độ nén nhóm này vượt PCB40 từ 16,3% đến 17,9%; cường độ uốn ở 28 ngày đạt giá trị cực đại (7,68 - 7,85 MPa), cao hơn mẫu đối chứng từ 4,5% đến 6,8%.

- Về ảnh hưởng của TB: Khi hàm lượng TB vượt quá 50%, chất lượng vữa bị suy giảm nghiêm trọng ở điều kiện dưỡng hộ tự nhiên. Cụ thể ở mốc 28 ngày, mẫu 75/25 chỉ đạt cường độ nén 12,67 MPa và cường độ uốn 2,34 MPa do TB phản ứng kém ở nhiệt độ phòng, khiến ma trận cấu trúc bị xốp rỗng.

- Khuyến nghị ứng dụng: Vùng tỷ lệ phối trộn TB/GGBFS từ 25/75 đến 35/65 là giải pháp công nghệ tối ưu, dung hòa tốt giữa tính công tác và khả năng chịu lực, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật để ứng dụng làm vật liệu xanh thay thế xi măng truyền thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T.-H. Le, T.-C. Dang and T.-T. T. Nguyen. High-performance geopolimer concrete: a review of recent developments. *Journal of Science and Transport Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 243-281, 2026. Internet: <https://www.jstt.vn/index.php/en/article/view/445>.
- [2] T. Wang, X. Fan and C. Gao. Development of high-strength geopolimer mortar based on fly ash-slag: Correlational analysis of microstructural and mechanical properties and environmental assessment. *Construction and Building Materials*, vol. 441, no. 30, pp. 137515, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137515>.
- [3] M. Dong, M. Elchalakani and A. Karrech. Development of high strength one-part geopolimer mortar using sodium metasilicate. *Construction and Building Materials*, vol. 236, no. 10, p. 117611, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117611>.
- [4] L. Hà, Đ. Chi và 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, tập 15, số 02, tr. 89-95, 2025. Internet: <https://ojs.jomc.vn/index.php/vn/article/view/837/634>.