

THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH TỶ LỆ TỐI ƯU GIỮA ĐẤT SÉT VÀ GEOPOLYMER GIÚP TẠO RA VẬT LIỆU KHÔNG NUNG PHỤC VỤ XÂY DỰNG

LÂM QUỲ THƯƠNG*, LÊ HUỖNH GIA HÂN, PHẠM THI YẾN NHI, ĐINH HẢI ĐĂNG
KHOA KỸ THUẬT CÔNG TRÌNH, TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÔN ĐỨC THẮNG

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm xác định tỷ lệ phối trộn tối ưu giữa đất sét tự nhiên và geopolymer gốc tro bay để sản xuất vật liệu xây dựng không nung có cường độ cao và thân thiện với môi trường. Thông qua việc khảo sát 45 cấp phối khác nhau với các tỷ lệ đất sét/tro bay và dung dịch kiềm hoạt hóa khác nhau, kết quả cho thấy cấp phối M30-70-2.5-0.3 chứa 240g đất sét, 560g tro bay và 48g tổng dung dịch kiềm đạt cường độ nén trung bình cao nhất là 28.29 MPa tại 28 ngày. Nghiên cứu cũng xác định tỷ lệ khối lượng tro bay/dung dịch kiềm khoảng 11,67 là tối ưu, trong khi việc tăng lượng dung dịch kiềm quá mức làm giảm cường độ do ảnh hưởng đến quá trình đông cứng. Kết quả khẳng định tiềm năng sử dụng đất sét địa phương kết hợp tro bay để sản xuất vật liệu xây dựng bền vững, đồng thời có khả năng giảm phát thải CO₂ so với gạch nung truyền thống.

Từ khóa: geopolymer; tro bay; composite đất sét; gạch không nung; tối ưu hóa cường độ nén; xây dựng bền vững

ABSTRACT

This study aimed to determine the optimal mixing ratio of natural clay and fly ash-based geopolymer for the production of high-strength, environmentally friendly unfired construction materials. A total of 45 mix designs were investigated by varying the clay-to-fly ash ratio and the composition of the alkaline activator solution. The results showed that the M30-70-2.5-0.3 mix, consisting of 240g of clay, 560g of fly ash, and 48g of total alkaline solution, achieved the highest average compressive strength of 28.29 MPa after 28 days of curing. The study also identified an optimal fly ash-to-alkaline solution mass ratio of approximately 11.67, whereas excessive alkaline solution content led to a reduction in compressive strength due to its adverse effect on the setting and hardening processes. These findings demonstrate the potential of utilizing locally available clay in combination with fly ash to produce sustainable construction materials while reducing CO₂ emissions compared with conventional fired bricks.

Keywords: Non-fired bricks, Fly-ash-based geopolymer, Clay-geopolymer composite, Compressive strength optimization

GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, xu hướng phát triển vật liệu xây dựng thân thiện với môi trường, đặc biệt là vật liệu không nung dựa trên công nghệ geopolymer, đã thu hút sự quan tâm rộng rãi của cộng đồng khoa học và ngành xây dựng trên toàn cầu. Ngành xây dựng Việt Nam đóng góp từ 8-10% GDP [1] nhưng tiêu thụ 36% năng lượng quốc gia [2] và phát thải 12-15% lượng CO₂ [3]. Chính phủ với cam kết giảm thiểu 27% khí thải nhà kính năm 2030 [4], đòi hỏi chuyển dịch sang vật liệu xây dựng xanh. Gạch không nung được ưu tiên phát triển theo Quyết định 567/QĐ-TTg, nhưng tỷ lệ sử dụng mới đạt 30-35%, trong khi tro bay từ các nhà máy nhiệt điện đang thải ra môi trường 16 triệu tấn/năm [5] với tỷ lệ tái chế chỉ 40%, dẫn đến tình trạng lãng phí tài nguyên và ô nhiễm.

Geopolymer được xem là giải pháp thay thế hiệu quả cho xi măng truyền thống, giúp giảm phát thải khí nhà kính và tận dụng phế thải công nghiệp như tro bay, đất sét, xỉ lò cao. Các nghiên cứu quốc tế tập trung vào việc sử dụng tro bay và đất sét làm nguyên liệu chính cho geopolymer, với các thí nghiệm đa

dạng về tỷ lệ phối trộn, nồng độ dung dịch kiềm và điều kiện dưỡng hộ. Các công trình nghiên cứu này chứng minh khả năng tạo ra vật liệu có cường độ chịu nén cao, khả năng chống ăn mòn và độ bền lâu dài [6]. Đồng thời, các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng tỷ lệ Si/Al và tỷ lệ dung dịch kiềm là những yếu tố quyết định đến cấu trúc mạng liên kết và tính chất cơ lý của vật liệu [7]. Tất yếu vẫn còn hạn chế được ghi nhận là chưa có sự thống nhất về tỷ lệ phối trộn tối ưu và chưa đầy đủ dữ liệu về khả năng chống nứt và độ bền trong điều kiện môi trường thực tế [8].

Nhiều nghiên cứu kết hợp các vật liệu khác vào hỗn hợp geopolymer để tăng tính chất. Như việc kết hợp 70% tro bay và 30% metakaolin đem lại cường độ chịu nén vượt trội (tăng tới 30%) so với việc chỉ sử dụng 100% tro bay truyền thống [9], sự cải thiện này có được là nhờ kích thước hạt siêu mịn và tính hoạt hóa cao của metakaolin, giúp lấp đầy các lỗ rỗng và tạo ra một cấu trúc nền geopolymer đồng nhất, đặc chắc và ít khuyết tật hơn dưới kính hiển vi. Tận dụng nguồn chất thải công nghiệp là tro bay kết hợp với xỉ lò cao nghiên cứu [10], cường độ chịu nén của vật liệu tăng tỷ lệ thuận với hàm lượng GGBS bổ sung, không chỉ giúp tăng mật độ khối

lượng và độ bền tổng thể mà còn làm giảm đáng kể độ rỗng cùng khả năng hút nước của viên gạch. Nghiên cứu khẳng định xi măng geopolymer trên cơ sở đất sét [11] là một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn, bền vững và thân thiện với môi trường cho xi măng Portland truyền thống nhờ khả năng giảm thiểu đáng kể lượng khí thải carbon và tối ưu hóa tính chất cơ lý, hiệu suất và cường độ chịu nén của vật liệu phụ thuộc chặt chẽ vào các thông số chế tạo, đặc biệt là điều kiện dưỡng hộ.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu tập trung khai thác nguồn nguyên liệu địa phương như đất sét, tro bay nhiệt điện và bùn đỏ alumin để phát triển vật liệu geopolymer không nung. Chế tạo gạch xây dựng không nung thân thiện với môi trường bằng cách sử dụng hỗn hợp xi măng kết hợp với tro trấu chưa xử lý và tro bay [12]. Sản xuất gạch đặc không nung chất lượng cao bằng cách tận dụng nguồn tro phế thải từ các nhà máy nhiệt điện, bao gồm tro bay và tro đáy làm nguyên liệu chủ đạo [13]. Ảnh hưởng mang tính quyết định của nồng độ dung dịch kiềm hoạt hóa và chế độ nhiệt độ bảo dưỡng đến sự phát triển cường độ chịu nén của vữa geopolymer thân thiện với môi trường [14]. Các kết quả ban đầu cho thấy tiềm năng lớn trong việc tạo ra vật

liệu xây dựng có cường độ phù hợp và thân thiện môi trường. Tuy nhiên, các nghiên cứu còn hạn chế về quy mô mẫu thử, thiếu đánh giá toàn diện về ảnh hưởng của tỷ lệ phối trộn và điều kiện dưỡng hộ đến tính chất vật liệu, cũng như chưa phát triển được quy trình sản xuất công nghiệp. Vật liệu xây dựng không nung từ geopolymer là xu hướng bền vững nhằm giảm phát thải CO₂, thay thế vật liệu nung thông thường và tận dụng phế thải công nghiệp như tro bay.

Các nghiên cứu trước đây tập trung nhiều vào kết hợp geopolymer với các vật liệu khác, ít có sử dụng nguồn vật liệu đất sét địa phương trong nghiên cứu gạch không nung tại Việt nam và ít nghiên cứu trên dải dài các tỷ lệ kết hợp để xác định các kết quả tối ưu nhất. Nghiên cứu: “Thực nghiệm kết hợp tỷ lệ đất sét và geopolymer tối ưu tạo ra vật liệu không nung phục vụ xây dựng” hướng đến việc tìm ra giải pháp tối ưu về cường độ cơ học, thời gian đông và tính kinh tế thông qua thực nghiệm kết hợp hỗn hợp với các tỷ lệ đất sét (30-70%) và dung dịch kiềm (Na₂SiO₃/NaOH = 2.0, 2.5, 3.0), đánh giá cường độ nén sau 7, 14, 28 ngày.

DỮ LIỆU THÍ NGHIỆM

Vật liệu

Đất sét

Là khoáng vật tự nhiên phổ biến, cấu trúc hạt mịn, hình thành do quá trình phong hóa aluminosilicat, thuộc nhóm kaolinite, illite, montmorillonite. Với đặc tính ướt - dẻo, khô - rắn, khả năng giữ nước cao, khả năng trao đổi ion tốt, phản ứng với dung dịch kiềm trong điều kiện thích hợp. Đất sét ruộng từ làng nghề gốm Bàu Trúc, Ninh Thuận cũ.

Sau khi được lấy (xem hình 2.1) và phơi khô tự nhiên được đưa vào phòng thí nghiệm dùng búa cao su để nghiền nhỏ và rây qua rây 0.15 mm để tách nước, hạt cát và các cốt liệu khác đang lẫn trong đất sét. Để xác định và đánh giá tính dẻo, bên cạnh đó cũng định lượng được trong đất có bao nhiêu % đất sét, đất sét được tiến hành thí nghiệm (xem hình 2.2 và bảng 2.1) giới hạn chảy (WL), giới hạn dẻo (WP) và chỉ số dẻo (PI) theo TCVN 4197:2012.

Tro bay



Hình 2.2. Xác định giới hạn chảy bằng phương pháp Casagrande

Giới hạn chảy (WL)	Giới hạn dẻo (WP)	Chỉ số dẻo (PI)
43.8287%	19.5652%	24.2635% (PI>7)

Bảng 2.1 Bảng tính giới hạn chảy, dẻo của đất sét

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
52.03%	21.56%	9.63%	5.17%	2.62%	2.53%	3.93%	2.16%	1.10%

Bảng 2.2. Thành phần trong tro bay

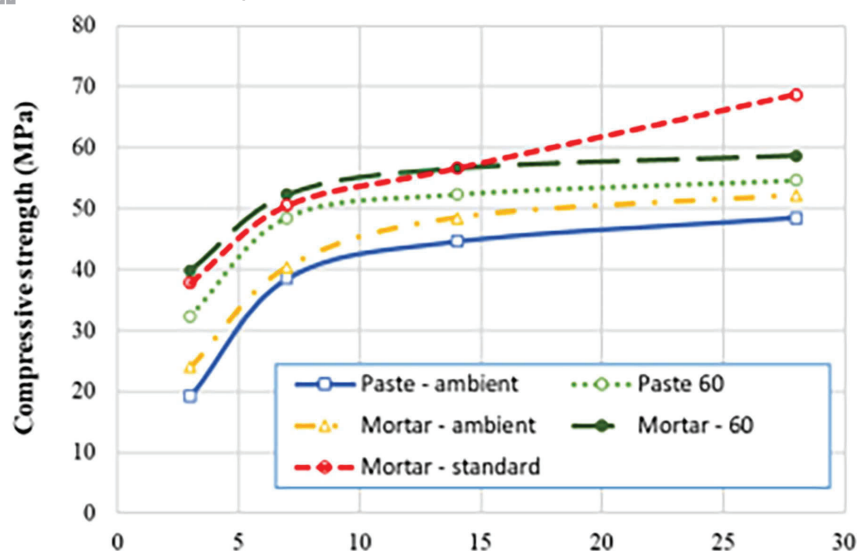
Trong thành phần khoáng giàu SiO₂ và Al₂O₃, tạo ra mạng liên kết aluminosilicate, góp phần tăng độ bền. Nguồn cung của tro bay (FA) từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải 3 (Trà Vinh) [14], loại F theo tiêu chuẩn ASTM C168-19, khối lượng riêng là 2,42 g/cm³. Thành phần trong tro bay được mô tả trong bảng 2.2 [15].

Geopolymer

Là polymer vô cơ tổng hợp từ các aluminosilicat (như tro bay, đất sét đã nung-metakaolin, xỉ lò cao) phản ứng kiềm hoạt hóa (alkaline activation), tạo ra một mạng lưới polymer vô cơ ba chiều. Từ các nguyên liệu chứa silica (SiO₂) và alumina (Al₂O₃) như tro bay, metakaolin hoặc đất sét hoạt hóa khi hòa tan trong môi trường kiềm mạnh (NaOH / KOH), tạo ra mạng lưới ba chiều (Si-O-Al-O) thông qua quá trình Geopolymer hóa. Cường độ nén cao, kháng axit, các hóa chất, chịu được thời tiết và có thể chịu được nhiệt độ cao, ít phát thải CO₂ trong quá trình sản xuất. Vật liệu không nung: trong quá trình sản xuất không cần nung, và giảm thiểu phát thải CO₂, năng lượng tiêu thụ, thân thiện với môi trường. Geopolymer là hợp chất hoá học vô cơ, quá trình hình thành từ nguồn nguyên liệu có tính kiềm như NaOH và Na₂SiO₃ (thuỷ tinh lỏng) phản ứng hoá học với nguyên liệu giàu alumina (tro bay). Khi kết hợp chúng sẽ tạo ra phản

ứng polymer hóa kiềm. Ứng dụng nhiều trong vật liệu xây dựng. Geopolymer có thành phần tro bay, có khả năng giảm 80% CO₂ so với xi măng truyền thống [6], tuy nhiên những ứng dụng thực tế tại Việt Nam còn hạn chế do chi phí cao, độ giòn và co ngót [16]. Bên cạnh việc giảm các chỉ số ô nhiễm do sản xuất truyền thống thì các nguyên vật liệu có từ tự nhiên lại ít được quan tâm hoặc sử dụng không đúng cách. Nhóm nghiên cứu nhìn ra được đất sét tự nhiên có tiềm năng cải thiện độ dẻo và giá thành, nhưng tỷ lệ tối ưu kết hợp với geopolymer đảm bảo cường độ và tính kinh tế vẫn chưa được làm rõ. Hiện tại các nghiên cứu nhằm tìm ra tỷ lệ tối ưu kết hợp với geopolymer đảm bảo cường độ và tính kinh tế.

Cường độ nén của vữa geopolymer là một thông số quan trọng đối với cường độ nén của bê tông geopolymer thu được. Để cung cấp thông số này trong mô hình dự đoán cường độ nén, các mẫu có kích thước 4x4x16cm đã được sản xuất. Vì vẫn chưa có tiêu chuẩn cho các thử nghiệm trên vữa/hỗ geopolymer, vữa geopolymer không chứa cát: chỉ sử dụng FA và AAS, bằng cách sử dụng tỷ lệ AAS/FA là 0,4, giống như trường hợp bê tông geopolymer cốt liệu tái chế đã được thử nghiệm [17]. Các thí nghiệm đã được tiến hành để xác định cường độ của bột nhão geopolymer với tỷ lệ



Hình 2.3. Cường độ nén của vữa geopolimer

BẢNG KHỐI LƯỢNG TRỘN MẪU
(Khuôn 3x50x50x50mm. Đơn vị: gam)

STT	Kí hiệu mẫu	Đất sét	Tro bay	NaOH rắn	Nước	Na ₂ SiO ₃	Ghi chú
1	M70-30-2.0-0.3	560	240	9	15	48	
2	M70-30-2.0-0.4	560	240	12	20	64	
3	M70-30-2.0-0.5	560	240	14	26	80	
4	M70-30-2.5-0.3	560	240	7	13	51	
5	M70-30-2.5-0.4	560	240	10	18	69	
6	M70-30-2.5-0.5	560	240	12	22	86	
7	M70-30-3.0-0.3	560	240	6	12	54	
8	M70-30-3.0-0.4	560	240	9	15	72	
9	M70-30-3.0-0.5	560	240	11	19	90	
10	M60-40-2.0-0.3	480	320	12	20	64	
11	M60-40-2.0-0.4	480	320	15	27	85	
12	M60-40-2.0-0.5	480	320	19	34	107	
13	M60-40-2.5-0.3	480	320	10	18	69	
14	M60-40-2.5-0.4	480	320	13	23	91	
15	M60-40-2.5-0.5	480	320	17	29	114	
16	M60-40-3.0-0.3	480	320	9	15	72	
17	M60-40-3.0-0.4	480	320	12	20	96	
18	M60-40-3.0-0.5	480	320	14	26	120	
19	M50-50-2.0-0.3	400	400	14	26	80	
20	M50-50-2.0-0.4	400	400	19	34	107	
21	M50-50-2.0-0.5	400	400	24	43	133	
22	M50-50-2.5-0.3	400	400	12	22	86	
23	M50-50-2.5-0.4	400	400	17	29	114	
24	M50-50-2.5-0.5	400	400	21	37	143	
25	M50-50-3.0-0.3	400	400	11	19	90	
26	M50-50-3.0-0.4	400	400	14	26	120	
27	M50-50-3.0-0.5	400	400	18	32	150	
28	M40-60-2.0-0.3	320	480	17	31	96	
29	M40-60-2.0-0.4	320	480	23	41	128	
30	M40-60-2.0-0.5	320	480	29	51	160	
31	M40-60-2.5-0.3	320	480	15	26	103	
32	M40-60-2.5-0.4	320	480	20	35	137	
33	M40-60-2.5-0.5	320	480	25	44	171	
34	M40-60-3.0-0.3	320	480	13	23	108	
35	M40-60-3.0-0.4	320	480	17	31	144	
36	M40-60-3.0-0.5	320	480	22	38	180	
37	M30-70-2.0-0.3	240	560	20	36	112	
38	M30-70-2.0-0.4	240	560	27	48	149	
39	M30-70-2.0-0.5	240	560	34	60	187	
40	M30-70-2.5-0.3	240	560	17	31	120	
41	M30-70-2.5-0.4	240	560	23	41	160	
42	M30-70-2.5-0.5	240	560	29	51	200	
43	M30-70-3.0-0.3	240	560	15	27	126	
44	M30-70-3.0-0.4	240	560	20	36	168	
45	M30-70-3.0-0.5	240	560	25	45	210	

** M70-30-2.0-0.3: 70% đất sét + 30% tro bay; Na₂SiO₃/NaOH = 2.0; (Na₂SiO₃+NaOH)/Tro bay = 0.3

AAS/FA = 0,4. Cường độ nén ở 3, 7, 14 và 28 ngày được thể hiện trong hình 2.3 [17], cường độ nén nằm trong khoảng 50-60MPa. Kết quả cho thấy sự tiến triển chung về cường độ nén của các mẫu vữa và bột nhão theo thời gian; Thật vậy, cường độ nén tăng nhanh cho đến ngày thứ 7 đối với các mẫu bột nhão/vữa geopolimer, và sau đó sự tiến triển chậm hơn. Sau đó, ảnh hưởng đáng kể của quá trình xử lý nhiệt đến cường độ nén được quan sát thấy: đối với cả mẫu vữa (có cát) và mẫu bột nhão (không có cát), quá trình xử lý nhiệt làm tăng cường độ nén khoảng 10-12% [17]

Quy trình thực hiện thực nghiệm và Tiêu chí chọn/loại mẫu

Nguyên lý hoạt động của vật liệu geopolimer

Quá trình geopolimer hóa gồm 3 giai đoạn chính:

Giai đoạn 1 - Hòa tan: Dưới tác dụng của dung dịch kiềm, các liên kết trong đất sét bị phá vỡ, giải phóng ion Si⁴⁺ và Al³⁺;

Giai đoạn 2 - Tạo gel: Các ion trên kết hợp lại tạo gel aluminosilicat;

Giai đoạn 3 - Tái kết tinh (polycondensation): Hình thành mạng lưới polymer ổn định.

Các nghiên cứu liên quan đến sự kết hợp giữa đất sét và geopolimer: Tỷ lệ Si/Al là yếu tố quyết định cấu trúc và cường độ của geopolimer. Trong khi đó đất sét (như kaolinite, montmorillonite...) ảnh hưởng đến độ hòa tan và hiệu quả geo-polyme hóa. Điều kiện nhiệt độ và thời gian đồng kết thành phẩm sau khi đúc khuôn để tiến hành thí nghiệm (nén, ngâm nước, oxy hóa...).

Định lượng tỉ lệ các thành phần

Dựa theo nghiên cứu của nhóm tác giả Võ Văn Thảo [15] về sự kết hợp giữa tro bay và tro bả mía. Nhóm đã giả định các tỷ lệ kết hợp giữa đất sét và tro bay để tìm mẫu tối ưu, các mẫu được thể hiện qua bảng 2.3. Mỗi mẫu đều có tỷ lệ độc lập với nhau. Tổng 45 số mẫu được thực nghiệm trong nghiên cứu tương ứng 45 tỷ lệ mẫu, mỗi tỷ lệ có 3 khối 50x50mm. Số lượng mẫu đảm bảo đủ tính khách quan, tin cậy để đem ra so sánh, phân tích và đánh giá tỷ lệ tối ưu. Ví dụ đặt tên mẫu như sau: M là đại diện cho khối lượng của tro bay và

Bảng 2.3 Bảng khối lượng thành phần mẫu.



Hình 2.4. Đất sét đã sấy khô, tro bay, bình Na_2SiO_3 (bình lớn), bình NaOH (bình nhỏ)

đất sét, M40-60 gồm 40% đất sét; 60% tro bay; tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$; tỷ lệ $(\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH})/\text{tro bay} = 0.3$.

Các bước tiến hành thí nghiệm

Chuẩn bị nguyên liệu (Hình 2.4): Đất sét và tro bay đã xử lý và rây qua rây 0.15mm, mịn và khô ráo. Hoá chất: NaOH (khô) và Na_2SiO_3 (thuỷ tinh lỏng) và nước sinh hoạt. Số lượng và khối lượng từng mẫu được cân đo dựa trên bảng 2.3.

Quy trình thực hiện đúc mẫu xem hình 2.5:

Bước 1: Định lượng đất sét, tro bay và hóa chất bằng cân điện tử theo khối lượng trong bảng khối lượng trộn mẫu.

Bước 2: Trộn đều đất sét và tro bay đã rây bằng máy trộn từ 3-5 phút. Pha hoá chất NaOH (khô) với nước tạo thành dung dịch kiềm mạnh, phân li Na^+ , OH^- (lưu ý: khi tác dụng NaOH với nước sẽ bốc hơi và nóng, cần để nguội trước khi pha tiếp). Sau khi dung dịch kiềm nguội tiến hành trộn với Na_2SiO_3 , và khuấy đều.

Bước 3: Trộn dung dịch $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ vào hỗn hợp đất sét và tro bay. Trộn lần 1, cho $\frac{1}{2}$ dung dịch vào và trộn trên máy từ 3-5 phút. Trộn lần 2, cho dung dịch còn lại vào và trộn tiếp từ 5-7 phút (quan sát hỗn hợp khô, dẻo hoặc nhão) đến khi hỗn hợp dẻo trở đi là đạt yêu cầu.

Bước 4: Nén hỗn hợp vào khuôn có kích thước 50x50mm. Nén lớp đầu, dày khoảng 15mm, đầm N=15-25 số lần búa. Nén lớp còn lại, số lần đầm búa $N > 20$ đến khi bằng mặt phẳng.

Bảo quản mẫu: Mẫu được bọc kín bằng màng bọc thực phẩm, bảo quản nơi khô ráo, dưỡng hộ ở nhiệt độ phòng



Hình 2.5. Một số bước trong quá trình đúc mẫu polymer đất sét: định lượng đất sét, tro bay và geopolymer theo tỷ lệ, lần lượt là quy trình đúc khuôn nén mẫu bằng tay, mẫu thử có độ dẻo đặc cao, dễ nén, Mẫu thử sau khi đúc khuôn và bảo quản sản phẩm

($20 \pm 2^\circ\text{C}$, độ ẩm $60 \pm 5\%$) trong 7, 14 và 28 ngày.

Thí nghiệm cường độ nén: Sử dụng máy nén thủy lực theo tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 [18]. Mỗi tỷ lệ phối trộn có 2-3 mẫu thử. Sau khi chọn các mẫu (xem hình 2.6) để tiến hành thí nghiệm nén đo cường độ, các mẫu này sau thời gian bảo quản 28 ngày đã được tháo màng bọc thực phẩm bảo vệ, để trong không khí bình thường của phòng thí nghiệm thêm 3 ngày, không còn bị ẩm bề mặt, xem có phản ứng với CO_2 không khí hay không nếu dung dịch kiềm NaOH có dư.

Tiêu chí sàng lọc và giải trình lý do loại bỏ 21 mẫu thử

Tổng số mẫu thực nghiệm được chuẩn bị theo ma trận phối trộn ban đầu là 45 tỷ lệ cấp phối. Tuy nhiên, trong giai đoạn chế tạo hỗn hợp vừa tươi, nhóm

tác giả đã áp dụng tiêu chí sàng lọc ngoại quan nghiêm ngặt để loại bỏ hoàn toàn 21 cấp phối và không đưa vào mốc dưỡng hộ đo cường độ chịu lực, cụ thể bao gồm:

Hiện tượng hỗn hợp quá khô/vón cục: Xuất hiện ở các cấp phối có lượng dung dịch kiềm hoạt hóa thấp (tỷ lệ lỏng/tro bay đạt 0.3) kết hợp với hàm lượng đất sét chiếm tỷ trọng cao ($\geq 50\%$). Do đất sét hút ẩm mạnh, lượng lỏng hoạt hóa không đủ bao phủ cấu trúc hạt mịn khiến vữa bị vỡ rời, vón cục cục bộ và không có khả năng kết khối bền vững trong khuôn thép.

Hiện tượng hỗn hợp quá nhão/chảy xệ (Hình 3.2): Tập trung ở các cấp phối có tỷ lệ đất sét chiếm từ 60% trở lên kết hợp lượng tổng dung dịch kiềm cao (tỷ lệ 0.5). Lực liên kết gel yếu không đủ giữ khung hình học, mẫu sau khi tháo khuôn xuất hiện các vết nứt co

Số ký	Mẫu	Đất sét	Tro bay	NaOH khô	Nước	Na ₂ SiO ₃
14	M60-40-2.5-0.4	480	320	13	23	91
15	M60-40-2.5-0.5	480	320	17	29	114
19	M50-50-2.0-0.3	400	400	14	26	80
21	M50-50-2.0-0.5	400	400	24	43	133
22	M50-50-2.5-0.3	400	400	12	22	86
23	M50-50-2.5-0.4	400	400	17	29	114
24	M50-50-2.5-0.5	400	400	21	37	143
26	M50-50-3.0-0.4	400	400	14	26	120
27	M50-50-3.0-0.5	400	400	18	32	150
28	M40-60-2.0-0.3	320	480	17	31	96
29	M40-60-2.0-0.4	320	480	23	41	128
30	M40-60-2.0-0.5	320	480	29	51	160
32	M40-60-2.5-0.4	320	480	20	35	137
33	M40-60-2.5-0.5	320	480	25	44	171
34	M40-60-3.0-0.3	320	480	13	23	108
35	M40-60-3.0-0.4	320	480	17	31	144
36	M40-60-3.0-0.5	320	480	22	38	180
38	M30-70-2.0-0.4	240	560	27	48	149
39	M30-70-2.0-0.5	240	560	34	60	187
40	M30-70-2.5-0.3	240	560	17	31	120
41	M30-70-2.5-0.4	240	560	23	41	160
42	M30-70-2.5-0.5	240	560	29	51	200
43	M30-70-3.0-0.3	240	560	15	27	126
44	M30-70-3.0-0.4	240	560	20	36	168

Bảng 2.4 Mẫu chọn lọc để nén và đo cường độ

ngót thể tích lớn bề mặt, chảy xệ và không thể đồng rắn tự nhiên.

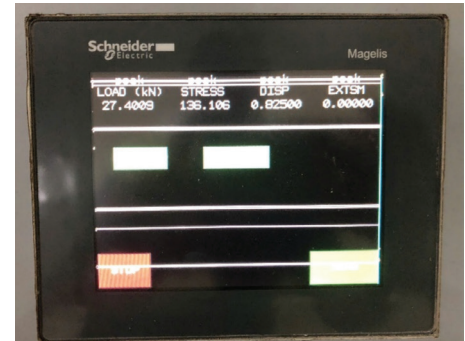
Do đó, chỉ có 24 cấp phối đạt độ đặc chắc và chất lượng hình học cao nhất được tháo màng bảo vệ bảo quản để đưa vào máy nén đo đặc cường độ (Bảng 2.4, Hình 2.6).

THẢO LUẬN VÀ KẾT LUẬN

Số liệu đo cường độ chịu nén của 24 cấp phối chọn lọc tại mốc thực nghiệm 28 ngày được xác định thông qua hệ thống máy nén thủy lực Schneider (Hình 3.1) trên các mẫu khối vuông kích thước chuẩn 50x50x50mm (tiết diện chịu lực thực tế A = 2.500mm²). Ứng suất chịu nén

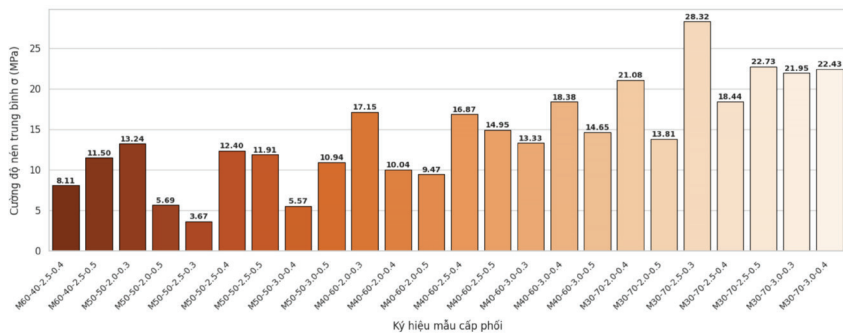


Hình 2.6 Mẫu chọn lọc để nén và đo cường độ

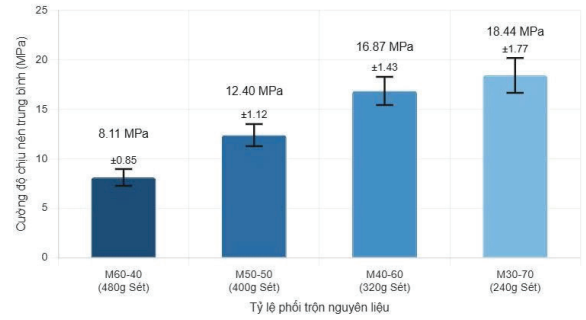


Hình 3.1 Hình ảnh thực tế lấy số liệu từ máy nén ở phòng thí nghiệm

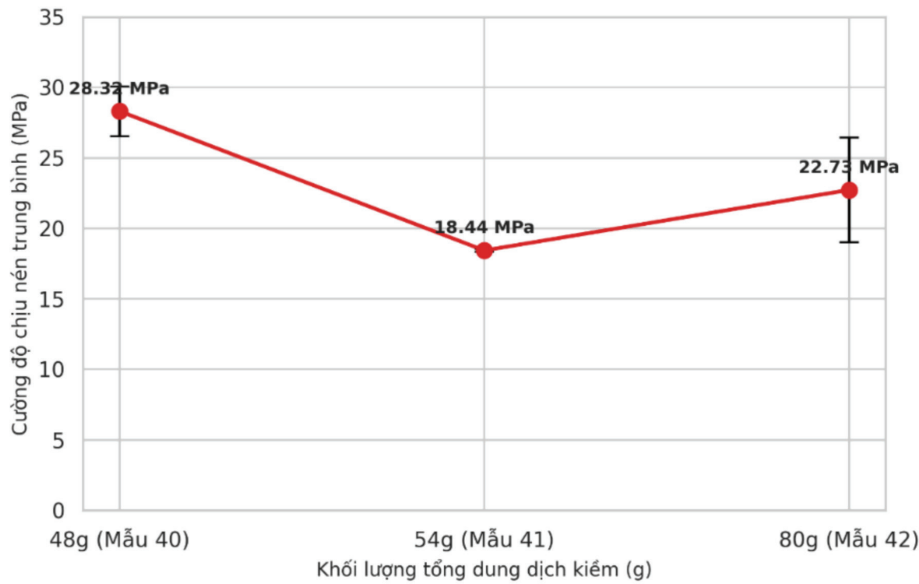
đơn trục (σ , MPa) được quy đổi từ lực nén đỉnh P (kN) theo công thức hệ thống. Để định lượng mức độ phân tán số liệu và kiểm soát sai số ngẫu nhiên giữa hai mẫu thử độc lập ($n=2$), nghiên cứu áp dụng mô hình phân tích toán học thống kê để xác định ba chỉ số đặc trưng: Cường độ nén trung bình ($\bar{X}$), Độ lệch chuẩn (SD) và Hệ số biến thiên (COV%). Các chỉ số sai số phân tán này được đối chiếu trực tiếp với giới hạn nghiêm ngặt quy định tại tiêu chuẩn quốc tế ASTM C109/C109M (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) và tiêu chuẩn quốc gia TCVN 3118:2022 về kiểm soát chất lượng thực nghiệm ngành Xây dựng. Theo đó, một loạt mẫu thực nghiệm đạt độ tin cậy khoa học và tính đồng nhất cấu trúc khi Hệ số biến thiên (COV%) không chế dưới ngưỡng giới hạn 15%. Quy trình tính toán toán học đối với mẫu tối ưu số 40 (M30-70-2.5-0.3) có lực nén đỉnh trung bình $P = 70.799\text{kN}$ ứng với hai giá trị ứng suất đơn lẻ ghi nhận lần lượt là $X1 = 27.067\text{MPa}$ và $X2 = 29.572\text{MPa}$ được thiết lập cụ thể. Xác định giá trị cường độ chịu nén trung bình ($\bar{X}$) là 28.32MPa . Xác định độ lệch chuẩn (SD) biểu thị sai số phân tán cấu trúc là 1.77MPa . Xác định hệ số biến thiên (COV%) để đánh giá chất lượng đúc mẫu 6.26% . Khi đối chiếu với các tiêu chuẩn kiểm soát sai số chất lượng nghiêm ngặt



Hình 3.2. Cường độ nén trung bình của các cấp phối



Hình 3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng đất sét đến cường độ nén 28 ngày



Hình 3.4. Biến thiên của cường độ nén theo khối lượng dung dịch kiềm (nhóm mẫu M30-70, Na_2SiO_3 , $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2.5$)

đất sét xuống ngưỡng biên thích hợp là 240g (nhóm mẫu M30-70), cường độ chịu nén trung bình tăng vọt, đạt dải giá trị cao ổn định từ 13.81MPa đến 28.32MPa.

Về mặt cơ chế khoa học vật liệu, đất sét tự nhiên chưa qua hoạt hóa nhiệt (nung thành metakaolin) không phải là nguồn sinh cường độ chính cho mạng lưới cấu trúc vô cơ mà đóng vai trò chủ đạo làm chất nền liên kết dẻo. Do khoáng sét có đặc tính giữ nước và diện tích bề mặt riêng lớn, việc sử dụng hàm lượng đất sét quá cao sẽ làm hỗn hợp vừa tươi bị nhão nề hoặc hút cạn lượng lỏng hoạt hóa tự do. Hiện tượng này làm suy giảm nghiêm trọng khả năng khuếch tán của các ion kiềm hoạt tính đến bề mặt các hạt tro bay, gây ức chế phản ứng hòa tan phân tách các nhóm ion Si^{4+} và Al^{3+} , từ đó làm giảm mật độ và thể tích gel aluminosilicate sinh ra, để lại nhiều khuyết tật cấu trúc chịu lực.

Ảnh hưởng của lượng dung dịch kiềm

Dung dịch kiềm đóng vai trò môi trường và chất kích hoạt động học của phản ứng tạo gel, tuy nhiên kết quả thực nghiệm chỉ ra cường độ chịu nén không tăng tuyến tính theo khối lượng dung dịch kiềm bổ sung. Khảo sát cụ thể trên nhóm mẫu M30-70 (cố định tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$), tại lượng tổng dung dịch kiềm thấp là 48g (Mẫu 40), cường độ chịu nén đạt đỉnh cực đại 28.32MPa. Khi tăng khối lượng dung dịch kiềm lên mức 54g (Mẫu 41), ứng suất nén trung bình sụt giảm mạnh xuống còn 18.44MPa. Khi tiếp tục tăng lượng dung dịch kiềm lên tới giới hạn 80g (Mẫu 42), cường độ nén có xu hướng phục hồi nhẹ lên mức 22.73MPa do nồng độ kiềm cao hỗ trợ phá vỡ thêm liên kết hạt mịn, nhưng đi kèm với đó là độ lệch chuẩn SD tăng vọt lên

Số kí hiệu	Mẫu	Tổng dung dịch kiềm (g)	Tỷ lệ Tro Bay / Dung dịch kiềm	Ứng suất TB (MPa)
40	M30-70-2.5-0.3	48	11.67	28.29
41	M30-70-2.5-0.4	54	10.37	18.44
42	M30-70-2.5-0.5	80	7.00	26.33
44	M30-70-3.0-0.4	56	10.00	22.43

Bảng 3.1. Bảng so sánh thành phần tỷ lệ tro bay (Tỷ lệ tro bay - dung dịch kiềm)

trong ngành Xây dựng và Cơ học vật liệu ($\text{COV} \leq 15\%$), giá trị này hoàn toàn nằm thất chặt trong giới hạn cho phép.

Ảnh hưởng của hàm lượng đất sét

Sự biến thiên số liệu thể hiện qua hệ thống bảng và biểu đồ (Hình 3.2, 3.3) kết quả minh chứng hàm lượng đất sét

đóng vai trò chi phối phi tuyến và tiêu cực đến sự phát triển cường độ chịu nén của vật liệu. Khi khảo sát trên các nhóm mẫu có hàm lượng đất sét lớn từ 320g đến 480g (các nhóm M60, M50, M40), cường độ nén của vật liệu phát triển rất hạn chế, chỉ dao động quanh mức thấp từ 3.67MPa đến 18.38MPa. Trái lại, khi khống chế giảm hàm lượng

Số kí hiệu	Mẫu	Đất sét (g)	Tro bay (g)	Dung dịch kiềm (g)	Tải (kN)	Ứng suất (MPa)
40	M30-70-2.5-0.3	240	560	17g OH + 31g nước (Tổng 48g)	70.799	28.32
41	M30-70-2.5-0.4	240	560	23g OH + 31g nước (Tổng 54g)	46.097	18.44
42	M30-70-2.5-0.5	240	560	29g OH + 51g nước (Tổng 80g)	65.835	22.73
43	M30-70-2.0-0.5	240	560	15g OH + 27g nước (Tổng 42g)	54.878	21.95
44	M30-70-3.0-0.4	240	560	20g OH + 36g nước (Tổng 56g)	56.078	22.43

Bảng 3.2. Bảng so sánh mẫu có thành phần tối ưu

mức nghiệm trọng là 3.71MPa (COV = 16.33%). (Xem Hình 3.4)

Cơ chế của hiện tượng này được giải thích là do sự dư thừa pha lỏng vượt quá điểm bão hòa của phản ứng thủy hóa. Lượng chất lỏng dư lớn kéo giãn khoảng cách liên kết giữa các hạt rắn, tạo độ rỗng mau dẫn dị hướng bên trong cấu trúc gel sau khi lượng nước tự do bay hơi trong quá trình dưỡng hộ. Hệ thống lỗ rỗng xốp này đóng vai trò là các điểm tập trung ứng suất nứt nẻ vĩ mô sớm khi mẫu chịu tải trọng nén trục trên máy Schneider, gây ra sự phân tán số liệu rất lớn giữa các mẫu thử trong cùng một loạt thí nghiệm và làm suy giảm chất lượng chịu lực tổng thể của thành phẩm.

Tỷ lệ tro bay/NaOH tối ưu

Tỷ lệ khối lượng giữa hạt rắn hoạt tính (Tro Bay) và chất lỏng hoạt hóa (Tổng dung dịch kiềm) là thông số cốt lõi quyết định mức độ đồng nhất cấu trúc vĩ mô của hệ geopolymer. Qua bóc tách ma trận số liệu của nhóm mẫu M30-70, giá trị tỷ lệ tro bay/dung dịch kiềm = 11.67 (ứng với mẫu số 40, chứa 560g tro bay và 48g dung dịch kiềm) được xác định là điểm vàng tối ưu hóa hệ thống. (Bảng 3.1)

Nếu tỷ lệ này giảm xuống (đồng nghĩa với việc lượng dung dịch kiềm tăng lên), như ở mẫu 41 (tỷ lệ đạt 10.37, ứng suất 18.44MPa) hay mẫu 42 (tỷ lệ đạt 7.00, ứng suất 22.73MPa), cấu trúc composite trở nên bất lợi do hiện tượng nhão công nghệ. Ở chiều ngược lại, nếu tỷ lệ này quá cao (lượng dung dịch kiềm quá

thấp không đủ thủy hóa), hỗn hợp sẽ rơi vào vùng 21 cấp phối bị loại bỏ do quá khô vón cục. Do đó, giá trị 11.67 chính là điểm cân bằng lý tưởng, đảm bảo cung cấp vừa đủ môi trường lỏng để hòa tan oxit hoạt tính trong tro bay loại F (SiO_2 và Al_2O_3), đồng thời duy trì độ dẻo công nghệ để quá trình đầm nén xung kích 2 lớp đạt độ đặc chắc cấu trúc cao nhất.

Công thức tối ưu

Căn cứ vào toàn bộ hệ thống số liệu cơ lý và sai số thống kê toán học được thu thập, nghiên cứu đã xác lập được công thức phối trộn tối ưu nhất cho dòng vật liệu composite không nung chịu lực này là M30-70-2.5-0.3 (Ký hiệu mẫu số 40) (Bảng 3.2). Thành phần định lượng cấu thành bao gồm Pha rắn, Pha lỏng chất hoạt hóa. Pha rắn: 240g Đất sét ruộng (30%) và 560g tro bay nhiệt điện loại F. Pha lỏng chất hoạt hóa: 120g dung dịch Na_2SiO_3 thương mại kết hợp với dung dịch NaOH được chế bị từ 17g NaOH khô (khan) hòa tan trong 31g nước. Công thức này đồng thời thỏa mãn toàn diện ba tiêu chí mục tiêu của bài báo khoa học: (1) Đạt tính năng cơ học cao nhất với cường độ chịu nén trung bình cực đại đạt 28.32MPa ở mốc 28 ngày; (2) Đảm bảo độ tin cậy và tính đồng nhất cấu trúc cao nhất với chỉ số biến thiên thắt chặt trong ngưỡng an toàn ổn định (COV = 6.26% < 15%); (3) Đạt hiệu quả tối ưu về mặt kinh tế kỹ thuật khi tiêu tốn lượng hóa chất hoạt hóa thấp nhất (48g tổng dung dịch kiềm), giúp giảm giá thành nguyên liệu đầu vào và hạn chế hiện tượng co ngót thể tích cho sản phẩm không nung thành phẩm.

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm chứng minh việc kết hợp đất sét tự nhiên với geopolymer gốc tro bay là một hướng tiếp cận có tính khả thi kỹ thuật rõ rệt để ứng dụng sản xuất vật liệu không nung phục vụ xây dựng. Cấp phối M30-70-2.5-0.3 sử dụng tỷ lệ phối trộn hợp lý đạt cường độ nén trung bình 28.32MPa tại mốc 28 ngày, mở ra tiềm năng lớn để thay thế các loại vật liệu nung truyền thống có cường độ chịu lực phân nhóm trung bình.

Để tài này giải quyết, khắc phục các hạn chế trên bằng cách kết hợp đất sét tự nhiên với geopolymer tro bay, sử dụng chất hoạt hóa kiềm ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$) để tạo vật liệu không nung rắn nhanh, cường độ nén cao, đồng thời giảm 15-20% chi phí so với geopolymer truyền thống. Đây là hướng tiếp cận tận dụng nguồn lực địa phương, phù hợp với chiến lược phát triển vật liệu xanh của Việt Nam, góp phần giải quyết đồng thời bài toán môi trường và kinh tế.

Nghiên cứu phân tích ảnh hưởng tỷ lệ tro bay/đất sét và tỷ lệ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ đến sự hình thành kết cấu geopolymer và cường độ chịu nén. Thấy được từ số liệu thu được trong quá trình nén cho thấy hoạt hóa kiềm và hàm lượng tro bay phụ thuộc vào tỷ lệ tro bay/đất sét.

Vấn đề đặt ra là tỷ lệ pha trộn đất sét - geopolymer với nhau thế nào để đạt đến độ bền tối ưu nhất, thay thế được cho gạch nung truyền thống. Qua thực nghiệm pha trộn và nén các mẫu thử với tỉ lệ trộn geopolymer kết hợp với tro bay/đất sét, ở các tỷ lệ khác nhau để xác định được các độ bền cơ học, đưa ra kết luận tỷ lệ nào quyết định độ bền tối ưu, đưa ra mẫu đảm bảo về tính chất của vật liệu bền vững. Các nghiên cứu cho thấy đất sét kết hợp với kiềm có thể tạo ra cấu trúc mạng bền vững. Ở Việt Nam, đã có nghiên cứu đề cập đến khả năng thay thế đất sét nung bằng vật liệu geopolymer, nhưng chưa hệ thống hóa tỷ lệ tối ưu giữa đất sét và geopolymer.

Hạn chế

Dù đạt được kết quả nổi bật, nghiên cứu vẫn được thực hiện trong phạm vi khảo sát giới hạn của 45 mẫu và chủ yếu đánh giá trên chỉ tiêu cường độ nén. Các đặc tính dài hạn như độ bền nước, co ngót, ổn định theo môi trường và độ bền sử



Hình 3.5. Hai mẫu ví dụ cho việc tỷ lệ mẫu chưa tối ưu dẫn đến hiện tượng “quá nhão”, không đạt độ dẻo nhất định để đúc khuôn

dụng thực tế chưa được khai thác. Ngoài ra, những mẫu quá dẻo cho thấy tỷ lệ phối trộn vẫn còn khá nhạy với lượng dung dịch kiềm (Hình 3.5). Vì vậy, để kết quả đủ sức thuyết phục ở mức ứng dụng thực tế, cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về vùng tối ưu lân cận quanh mẫu “M30-70-2.5-0.3” và mở rộng sang các chỉ tiêu độ bền lâu.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN TƯƠNG LAI

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm chứng minh việc kết hợp đất sét tự nhiên với geopolymer gốc tro bay là hướng đi có tính khả thi kỹ thuật cao để chế tạo vật liệu không nung. Cấp phối M30-70-2.5-0.3 (chứa 240g đất sét, 560g tro bay và 48g tổng dung dịch kiềm) được xác định là công thức tối ưu, cho cường độ chịu nén trung bình đạt 28.29MPa tại 28 ngày, hoàn toàn đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành đối với vật liệu xây dựng chịu lực kết cấu phân nhóm trung bình.

Đề xuất mang tính tiềm năng và định hướng mở rộng: Trên cơ sở các kết quả đạt được về mặt cường độ cơ học, hệ vật liệu composite này thể hiện tiềm năng lý thuyết lớn trong việc hướng tới mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính ra môi trường sinh thái và giảm chi phí sản xuất nhờ tận dụng nguồn phế thải công nghiệp lớn (tro bay). Tuy nhiên, đây mới chỉ là các kết quả đánh giá thực nghiệm cơ bản ban đầu trong phòng thí nghiệm. Để đưa loại vật liệu này vào

ứng dụng thực tế thương mại một cách an toàn và bền vững, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung làm rõ các nội dung cốt lõi bao gồm: Phân tích đánh giá vòng đời sản phẩm một cách định lượng (LCA), khảo sát chi tiết bài toán kinh tế giá thành công nghiệp, thực nghiệm các chỉ tiêu cơ lý dài hạn như độ co ngót theo thời gian, độ hút nước, khả năng chống nứt nẻ và độ bền lâu của cấu trúc vật liệu dưới tác động xâm thực của môi trường thực tế./

LỜI CẢM ƠN

Nhóm nghiên cứu xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Khoa Kỹ thuật Công trình và cán bộ phụ trách phòng thí nghiệm thuộc trường Đại học Tôn Đức Thắng đã tạo điều kiện và hỗ trợ thiết bị để chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tổng thống kê. (2023). Báo cáo kinh tế chuyên ngành xây dựng Việt Nam năm 2023. Hà Nội: Tổng cục Thống kê.
2. Bộ xây dựng. (2022). Báo cáo tiêu thụ năng lượng xây dựng lớn ở Việt Nam. Hà Nội: Xây dựng.
3. VNEEP. (2021). Báo cáo đánh giá phát thải CO₂ xây dựng lớn ở Việt Nam. Hà Nội: Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc tại Việt Nam.
4. UNDP. (2022). Báo cáo cam kết giảm phát thải khí nhà kính của Việt Nam đến năm 2030. Hà Nội: Chương trình Phát triển Liên Hợp Quốc tại Việt Nam.
5. Tập đoàn Điện lực Việt Nam. (2023). Báo cáo phát thải và tái chế tro bay tại Việt Nam. Hà Nội:

Tập đoàn Điện lực Việt Nam.

6. Davidovits, J. (2015). Hóa học địa trùng hợp và phát triển bền vững. Tạp chí Khoa học Vật liệu, 50(1), 1-15.
7. Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. Journal of Materials Science, 42(9), 2917-2933.
8. Shi, C., Krivenko, P. V., & Roy, D. M. (2019). Xi măng và bê tông hoạt hóa kiềm. CRC Press.
9. Barbhuiya, S., & Pang, E. (2022). Strength and microstructure of geopolymer based on fly ash and metakaolin. Materials, 15(10), 3732. <https://doi.org/10.3390/ma15103732>.
10. Ansari, G. A., & Kumar, S. S. (2025). Geopolymerization of fly ash and GGBS for sustainable industrial waste utilization. Scientific Reports, 15(1), 34318. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16574-5>
11. Khan, R., Iqbal, S., Soliyeva, M., Ali, A., & Elboughdiri, N. (2025). Advanced clay-based geopolymer: influence of structural and material parameters on its performance and applications. RSC Advances, 15(16), 12443-12471. <https://doi.org/10.1039/d4ra07601j>
12. Ngo, S. H., & Huynh, T. P. (2023). Engineering properties of unfired building bricks produced using URHA-FA cement blends. Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering, 65(3), 56-62. [https://doi.org/10.31276/VJSTE.65\(3\).56-62](https://doi.org/10.31276/VJSTE.65(3).56-62)
13. Huynh, T. P., Nguyen, V. D., Nguyen, V. L., & Le, T. T. (2018). Properties of unfired solid bricks produced primarily from thermal power plant fly ash and bottom ash. CTU Journal of Innovation and Sustainable Development, 54(Special Issue: Engineering), 66-73. <https://doi.org/10.22144/ctu.jsti.2018.041>
14. Phạm Thanh Tùng, Châu Trường Linh, Nguyễn Thành Đạt (2018), Nghiên cứu sử dụng tro bay từ nhà máy nhiệt điện duyên hải làm cốt đất-tro bay gia cố nền đất yếu hạ tầng dự án khu đô thị mới phía đông đường Mậu Thân, thành phố Trà Vinh. Journal of Transportation Science and Technology, Vol 27+28.
15. Võ Văn Thảo, Lê Đức Hiên, Phan Tô Anh Vũ, Ngô Mạch Vĩnh Thuận, Trần Công Nam, & Hồ Thị Cẩm Tú. (2025). Nghiên cứu tính chất của củi geopolymer gốc tro bay kết hợp với tro bã mía. Tạp chí Xây dựng, 1(10), 148-151. ISSN 2734-9888.
16. Nguyễn Văn Tuấn, Lê Minh Hùng, & Trần Thị Mai. (2022). nghiên cứu ứng dụng geopolymer tro bay Nghiên cứu tại Việt Nam. Tạp chí Xây dựng vật liệu, 45(2), 56-64.
17. Le, H. B., Bui, Q. B., & Tang, L. (2021). Geopolymer recycled aggregate concrete: From experiments to empirical models. Materials, 14(5), 1180
18. Bộ Khoa học và Công nghệ (2022). TCVN 3118:2022 – Bê tông – Phương pháp xác định cường độ chịu nén. Hà Nội: Bộ Khoa học và Công nghệ.