

Ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu đến các tính chất cơ lý của vữa Geopolymer ứng dụng trong gạch bông gió

Cao Nguyên Thi^{1*}, Nguyễn Hoàng Phúc², Nguyễn Thị Hải Yến³, Nguyễn Minh Tường¹

¹Khoa Kỹ Thuật Công Nghệ, Trường Đại học Tiền Giang

²Công Ty Cổ Phần Đầu Tư Xây Dựng Vitecccons

³Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Vữa Geopolymer
Tro trấu
Tính công tác
Cường độ nén
Cường độ uốn
Gạch bông gió

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ tro trấu đến các đặc tính cơ lý của vữa Geopolymer không xi măng, nhằm hướng tới vật liệu xây dựng xanh. Cấp phối vữa Geopolymer được thiết kế sử dụng xi lò cao nghiền mịn, dung dịch kiềm hóa natri metasilicate, cát sông và nước, với tỷ lệ tro trấu thay thế tro bay biến thiên từ 30% đến 70%. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng hàm lượng tro trấu thay thế tro bay vượt quá 50% gây suy giảm đáng kể tính công tác và cường độ của vật liệu. Tại tỷ lệ tối ưu 30% tro trấu và nồng độ Na₂O 3,5%, vữa Geopolymer đạt được các chỉ tiêu kỹ thuật đáp ứng yêu cầu của vữa xi măng truyền thống. Kết quả này tạo tiền đề khoa học cho việc ứng dụng sản xuất gạch thông gió thân thiện môi trường, góp phần giảm thiểu phát thải carbon ngành xây dựng.

KEYWORDS

Geopolymer mortar
Rice hush ash
Workability
Compressive strength
Flexural strength
Ventilation block

ABSTRACT

This study investigates the influence of Rice Husk Ash (RHA) content on the mechanical properties of Geopolymer mortar, aiming to develop green building materials. The Geopolymer mixtures were designed using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), sodium metasilicate activator solution, river sand, and water, with RHA replacing fly ash at ratios ranging from 30% to 70%. Experimental results indicate that an RHA replacement level exceeding 50% caused a significant decline in both the workability and mechanical strength of the material. At the optimal substitution rate of 30% RHA with a 3.5% Na₂O concentration, the Geopolymer mortar achieved technical specifications meeting the requirements of traditional cement mortar. These findings serve as a scientific basis for the application of eco-friendly ventilation block production, contributing to carbon emission mitigation in the construction industry.

1. Giới thiệu

Trong vài thập kỷ qua, ngành công nghiệp sản xuất xi măng Portland đang đối mặt với những thách thức lớn về môi trường, chiếm khoảng 8% tổng lượng khí thải CO₂ toàn cầu [1]. Trước áp lực giảm thiểu biến đổi khí hậu, việc tìm kiếm các vật liệu kết dính xanh để thay thế xi măng truyền thống đang trở thành xu hướng tất yếu của ngành xây dựng thế giới [2]. Trong bối cảnh đó, công nghệ Geopolymer (bê tông/vữa không xi măng) nổi lên như một giải pháp triển vọng nhờ khả năng tận dụng các phụ phẩm công nghiệp và nông nghiệp, đồng thời sở hữu các tính chất cơ lý vượt trội cùng khả năng giảm phát thải carbon lên đến 80% so với vật liệu truyền thống [3].

Tại Việt Nam, tro bay (FA) từ các nhà máy nhiệt điện và xi lò cao nghiền mịn (GGBFS) từ công nghiệp luyện kim là những nguồn nguyên liệu aluminosilicate phổ biến đã được nghiên cứu ứng dụng rộng rãi trong chế tạo Geopolymer [4, 5]. Tuy nhiên, là một quốc gia nông nghiệp hàng đầu thế giới về xuất khẩu gạo, Việt Nam còn sở hữu nguồn tro trấu (RHA) vô cùng dồi dào. Với hàm lượng silica SiO₂ vô định hình

cao (có thể đạt trên 85-90%), tro trấu được đánh giá là một vật liệu pozzolanic siêu hoạt tính, có tiềm năng lớn để tham gia chế tạo vữa Geopolymer [6].

Mặc dù tiềm năng là rất lớn, các nghiên cứu hiện nay về RHA trong Geopolymer thường chỉ dừng lại ở vai trò phụ gia độn nhẹ hoặc thay thế một phần nhỏ xi măng [7]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, việc sử dụng hàm lượng RHA thay thế FA càng lớn thường dẫn đến sự suy giảm về tính công tác do yêu cầu lượng nước cao, gây khó khăn cho quá trình tạo hình và làm giảm cường độ phát triển sớm của vật liệu [8]. Ngoài ra, bất kể dưỡng hộ ở nhiệt độ phòng hay gia nhiệt, sự sụt giảm cường độ nén ở các thời điểm 7 và 28 ngày càng trở nên rõ rệt khi tỷ lệ RHA tăng cao [6, 8]. Tuy nhiên, việc phối trộn xi lò cao cùng với tro bay sẽ giúp vữa đông rắn nhanh và đạt cường độ cao ngay ở nhiệt độ thường nhưng vẫn kéo dài thời gian đông kết đảm bảo tính công tác.

Dựa trên cơ sở trên, nghiên cứu này tập trung khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu thay thế tro bay (từ 30% đến 70%) đến các đặc tính cơ lý của vữa Geopolymer, nhằm ứng dụng cho sản phẩm

*Liên hệ tác giả: caonguyenthi@tgu.edu.vn

Nhận ngày 13/01/2026, sửa xong ngày 07/04/2026, chấp nhận đăng ngày 08/04/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1222>

gạch bông gió thân thiện môi trường, góp phần thực hiện chiến lược phát triển vật liệu xây dựng xanh tại Việt Nam.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1. Vật liệu thí nghiệm

Các nguyên liệu được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm: tro trấu được cung cấp từ nguồn đốt công nghiệp ở nhiệt độ ~700 °C, tro bay loại F lấy từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải (Trà Vinh), xi lò cao nghiền mịn loại S95, là vật liệu thường được ghi nhận có khả năng tham gia phản ứng tốt trong môi trường kiềm hoạt hóa, đặc biệt ở điều kiện đường hộ thường và xi măng PBC 40 Hà Tiên với khối lượng riêng lần lượt là 0,96 g/cm³, 2,28 g/cm³, 2,89 g/cm³ và 3,05 g/cm³. Kết quả phân tích thành phần hóa của tro trấu, tro bay, xi lò cao và xi măng được thể hiện ở Bảng 1. Cát sông được dùng trong nghiên cứu có Mô-đun độ lớn 2,3 và khối lượng riêng 2,68 g/cm³. Dung dịch kiềm bao gồm natri

hydroxit và natri silicat với tỷ lệ Na₂O điều chỉnh ở mức 3,0 % và 3,5 %.

2.2. Phương pháp thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, 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 và hoàn thiện cấp phối dựa trên thực nghiệm và được thể hiện trong Bảng 2 và Bảng 3.

Tính công tác của hỗn hợp vữa Geopolymer được thể hiện qua thí nghiệm xác định tính lưu động bằng phương pháp bàn dần theo TCVN 3121-3:2022 [10]. Sau đó, đúc các tổ mẫu có kích thước 160x40x40 mm được bảo dưỡng đến 3, 7 và 28 ngày để xác định cường độ chịu nén và kéo uốn theo TCVN 3121-11:2022 [11]. Các mẫu được đánh giá độ hút nước tại thời điểm 28 ngày theo TCVN 3113:2022. Phương pháp xác định độ hút nước [12]. Thiết bị và dụng cụ thí nghiệm dùng trong nghiên cứu thể hiện ở Hình 1.

Bảng 1. Thành phần hóa của tro trấu, tro bay, xi lò cao và xi măng (%).

Thành phần %	Xi măng (XM)	Tro trấu (RHA)	Tro bay (FA)	Xi lò cao (GGBFS)
SiO ₂	21,98	34,04	51,92	86,98
Al ₂ O ₃	5,24	14,36	29,44	1,61
Fe ₂ O ₃	2,79	-	4,41	0,77
CaO	61,92	40,51	2,07	1,50
MgO	2,55	7,25	1,81	1,60
SO ₃	2,32	0,12	0,11	0,82
FeO	-	-	0,61	-
TiO ₂	-	-	0,97	-
Na ₂ O	0,15	-	0,55	2,18
K ₂ O	-	-	0,43	1,67
Cl-	-	0,002	-	-
MKN	2,71	-0,08	6,45	2,87

Bảng 2. Thành phần hỗn hợp vữa Geopolymer sử dụng trong nghiên cứu (kg/m³).

Tên mẫu	RHA/ (RHA + FA)	Tro trấu (RHA) (gam)	Tro bay (FA) (gam)	Xi lò cao (GGBFS) (gam)	Meta Silicate (gam)	Cát (C) (gam)	Nước (N) (gam)	Ghi chú
A3	30 %	99	232	331	386	1350	220	Na ₂ O = 3,0 %
A4	40 %	132	199	331	386	1350	220	
A5	50 %	166	166	331	386	1350	220	
A6	60 %	199	132	331	386	1350	220	
A7	70 %	232	99	331	386	1350	220	
B3	30 %	87	203	290	450	1350	215	Na ₂ O = 3,5 %
B4	40 %	116	174	290	450	1350	215	
B5	50 %	145	145	290	450	1350	215	
B6	60 %	174	116	290	450	1350	215	
B7	70 %	203	87	290	450	1350	215	

Bảng 3. Thành phần nguyên vật liệu mẫu vữa xi măng đối chứng.

Tên mẫu	Xi măng PCB40 (XM) (gam)	Cát (C) (gam)	XM/C	N/XM
XM	675	1350	0,5	0,42



(a) Dụng cụ xác định tính lưu động



(b) Thiết bị thử nén và uốn vữa

Hình 1. Dụng cụ thí nghiệm dùng để xác định tính công tác và cường độ nén, uốn của vữa Geopolymer.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu thay thế đến tính lưu động của hỗn hợp vữa Geopolymer

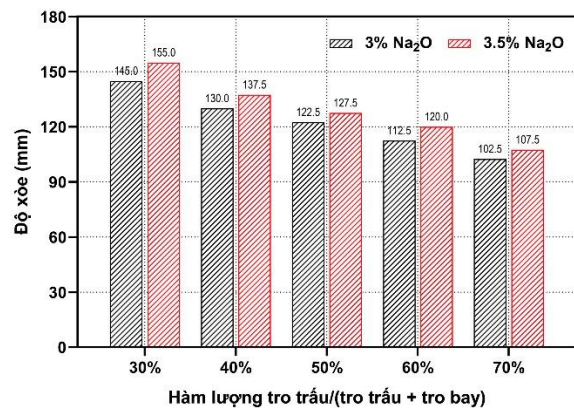
Bảng 4. Kết quả thí nghiệm độ lưu động (mm).

STT	Ký hiệu mẫu	Tỷ lệ % Na ₂ O	Tro trấu/ (tro trấu + tro bay)	Kết quả
1	A3	3.0 %	30 %	146
2	A4	3.0 %	40 %	132
3	A5	3.0 %	50 %	123
4	A6	3.0 %	60 %	115
5	A7	3.0 %	70 %	105
6	B3	3.5 %	30 %	154
7	B4	3.5 %	40 %	139
8	B5	3.5 %	50 %	128
9	B6	3.5 %	60 %	120
10	B7	3.5 %	70 %	108
11	XM	-	-	140

Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng tỷ lệ RHA thì tính lưu động có xu hướng giảm dần thể hiện Hình 2 và Bảng 4. Tại tỷ lệ thay thế 30 % mẫu A3, B3 đạt độ xòe cao nhất (146–154 mm), tương đương và thậm chí vượt trội so với mẫu vữa xi măng đối chứng (140 mm). Tuy nhiên, khi hàm lượng tro trấu tăng dần từ 30 % lên 70 %, tính công tác suy giảm đáng kể, độ xòe giảm trung bình khoảng 8-10 % cho mỗi mức tăng 10 % tro trấu, đạt giá trị thấp nhất ở các mẫu A7 và B7.

Sự suy giảm này chủ yếu do sự khác biệt về đặc điểm hình thái học của cốt liệu mịn: trong khi tro bay bao gồm các hạt hình cầu tạo "hiệu ứng bi lăn" giúp giảm ma sát nội và cải thiện độ linh động, thì tro

trấu lại có cấu trúc vô định hình, xốp rỗng với diện tích bề mặt lớn. Đặc tính này dẫn đến khả năng hút nước mạnh, làm giảm lượng nước tự do tham gia tạo độ dẻo cho hỗn hợp [13]. Mặc dù việc tăng nồng độ chất hoạt hóa Na₂O từ 3,0 % lên 3,5 % có cải thiện nhẹ độ xòe nhờ thúc đẩy tốc độ hòa tan và tạo gel, nhưng không đủ để bù đắp hiệu ứng cản trở dòng chảy do cấu trúc xốp của tro trấu gây ra. Do đó, để đảm bảo yêu cầu thi công và độ đặc chắc cho sản phẩm gạch bông gió, hàm lượng tro trấu thay thế tối ưu được khuyến nghị duy trì ở mức 30–40 %.



Hình 2. Ảnh hưởng của RHA đến độ xòe của hỗn hợp vữa Geopolymer.

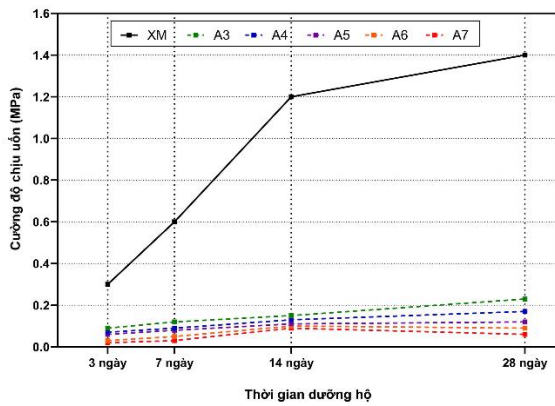
3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu thay thế đến cường độ uốn của vữa Geopolymer

Kết quả cường độ chịu uốn của mẫu Geopolymer khi thay đổi tỷ lệ RHA thay thế FA từ 30 % đến 70 % được thể hiện trong Bảng 5. Nhìn chung, cường độ chịu uốn của vữa Geopolymer khá thấp so với vữa xi

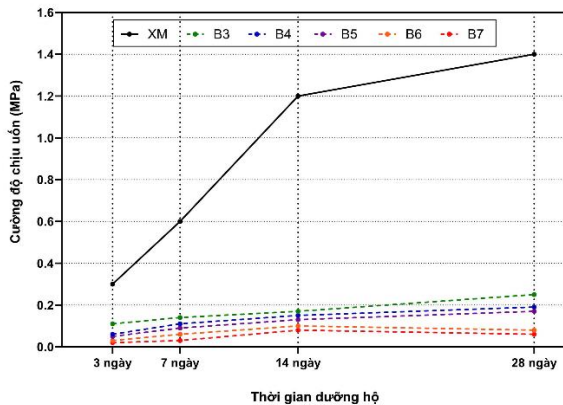
măng (Hình 3 và Hình 4). Mẫu đối chứng XM đạt 1.40 MPa ở 28 ngày, trong khi mẫu Geopolymer tốt nhất (B3) chỉ đạt 0.25 MPa.

Bảng 5. Kết quả cường độ chịu uốn của mẫu vữa Geopolymer (MPa).

STT	Ký hiệu mẫu	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày
1	A3	0,09	0,12	0,15	0,23
2	A4	0,07	0,09	0,13	0,17
3	A5	0,06	0,08	0,11	0,12
4	A6	0,03	0,06	0,10	0,09
5	A7	0,02	0,03	0,09	0,06
6	B3	0,11	0,14	0,17	0,25
7	B4	0,08	0,10	0,15	0,19
8	B5	0,06	0,09	0,13	0,17
9	B6	0,03	0,04	0,10	0,08
10	B7	0,02	0,03	0,08	0,06
11	XM	0,30	0,60	1,20	1,40



Hình 3. Ảnh hưởng của RHA đến cường độ uốn của vữa Geopolymer với Na₂O 3 %.



Hình 4. Ảnh hưởng của RHA đến cường độ uốn của vữa Geopolymer với Na₂O 3,5 %.

Cường độ chịu uốn giảm mạnh khi tăng hàm lượng RHA thay thế FA từ 30 % đến 70 % bởi vì cường độ chịu uốn của vữa Geopolymer

phụ thuộc cốt lõi vào sự hình thành mạng lưới aluminosilicate. Tro bay đóng vai trò kiến tạo ma trận gel đặc chắc nhờ hoạt tính pozzolanic cao, trái ngược với tro trấu (RHA) có cấu trúc xốp và phản ứng chậm làm gián đoạn liên kết, dẫn đến cường độ uốn giảm mạnh khi hàm lượng thay thế tăng cao.

Ngoài ra, việc tăng nồng độ Na₂O lên 3,5 % đã cải thiện đáng kể cường độ chịu uốn của vữa Geopolymer ở tỷ lệ RHA thay thế từ 30 % đến 50 % thông qua việc thúc đẩy động học phản ứng và gia tăng mật độ gel.

3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu thay thế đến cường độ nén của vữa Geopolymer

Dựa vào Bảng 6 và Hình 5, Hình 6 cho thấy cường độ chịu nén của vữa Geopolymer chịu ảnh hưởng từ việc tăng hàm lượng RHA và nồng độ chất hoạt hóa Na₂O.

Bảng 6. Kết quả cường độ chịu nén của mẫu vữa Geopolymer (Mpa).

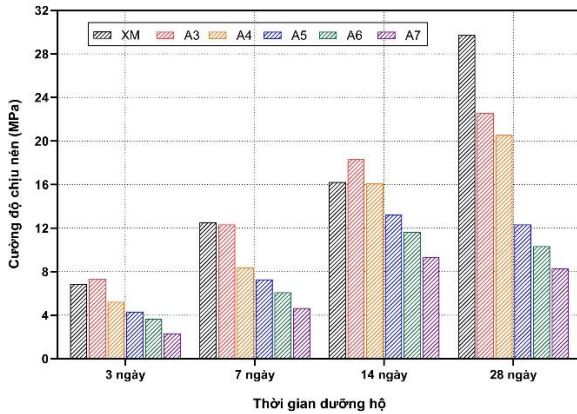
STT	Ký hiệu mẫu	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày
1	A3	7,3	12,3	18,3	22,6
2	A4	5,2	8,4	16,1	20,6
3	A5	4,8	7,3	13,2	12,3
4	A6	3,7	6,1	11,6	10,4
5	A7	2,3	4,7	9,3	8,3
6	B3	11,0	14,7	20,2	24,3
7	B4	8,6	11,9	17,1	20,8
8	B5	7,3	9,8	13,4	14,7
9	B6	4,5	8,2	12,3	11,3
10	B7	3,2	6,4	11,7	10,9
11	XM	6,8	12,5	16,2	29,7

Cấp phối tối ưu được xác định là mẫu B3 (30 % tro trấu, 3,5 % Na₂O) thể hiện tốc độ phát triển cường độ rất nhanh, tăng mạnh từ 11 MPa đến 20,2 MPa ở 14 ngày tuổi. Điều này nhờ vào phản ứng kích hoạt kiềm mạnh mẽ của xi lò cao và bề mặt các hạt tro bay, tạo cường độ sớm tốt hơn so với các mẫu Geopolymer có hàm lượng tro trấu cao. Nhưng ở 28 ngày tuổi, mẫu B3 đạt cường độ nén là 24,3 MPa, tương đương 81,8 % so với mẫu xi măng đối chứng (29,7 MPa).

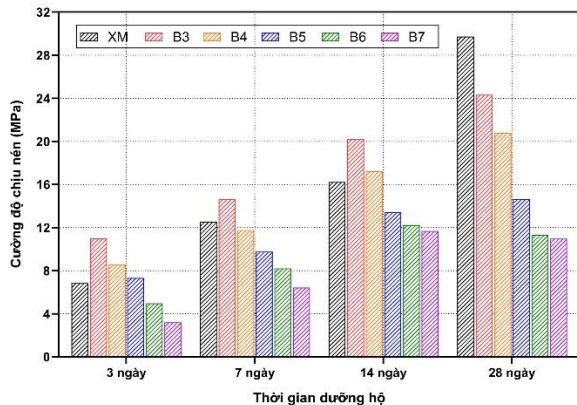
Trong khi tỷ lệ tro trấu vượt quá ngưỡng 50 %, với các mẫu A7 và B7 chỉ đạt khoảng 8,3 MPa đến 10,9 MPa sau 28 ngày (giảm hơn 60 % so với mẫu A3 và B3). Kết quả suy giảm cường độ nén khi tăng hàm lượng tro trấu trong nghiên cứu này phù hợp với xu hướng đã được công bố trước đây đối với hệ Geopolymer nền tro bay/tro trấu [15,16]. Các nghiên cứu cho thấy RHA chỉ phát huy hiệu quả ở một khoảng thay thế tối ưu; khi tỷ lệ RHA tăng quá cao, cường độ nén thường giảm do làm thay đổi cân bằng thành phần phản ứng, tăng nhu cầu nước và tăng độ rỗng của ma trận đóng rắn. Ngược lại, sự hiện diện của xi lò cao nghiền mịn giúp tăng khả năng phản ứng của hệ chất kết

đỉnh trong môi trường kiềm và thúc đẩy sự hình thành cấu trúc vi mô đặc chắc hơn, đặc biệt ở điều kiện dưỡng hộ nhiệt độ thường. Hơn nữa, hình thái cấu trúc xốp và khả năng hút nước mạnh của tro trấu góp phần làm giảm mật độ vật liệu [13].

Tuy nhiên, việc tăng nồng độ chất hoạt hóa từ 3,0 % lên 3,5 % Na₂O đã cải thiện đáng kể cường độ nén thông qua việc thúc đẩy quá trình hòa tan và polymer hóa, giúp gia tăng mật độ liên kết và cường độ chịu lực cho vật liệu [17].



Hình 5. Ảnh hưởng của RHA đến cường độ nén của vữa Geopolymer với Na₂O 3 %.



Hình 6. Ảnh hưởng của RHA đến cường độ nén của vữa Geopolymer với Na₂O 3,5 %.

3.4. Ảnh hưởng của hàm lượng tro trấu thay thế đến độ hút nước của vữa Geopolymer

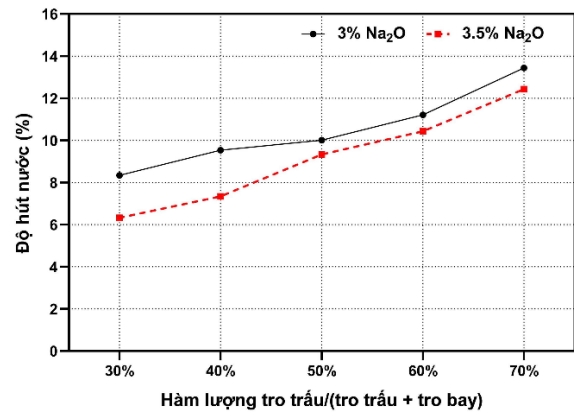
Dựa vào Bảng 7 và Hình 7 ta thấy độ hút nước của vữa Geopolymer có xu hướng tăng tuyến tính khi hàm lượng tro trấu trong hỗn hợp tăng lên. Khi tỷ lệ tro trấu tăng từ 30 % lên 70 % thì độ hút nước tăng mạnh gần gấp 2 lần. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ đặc thù cấu trúc xốp và hình thái đa dạng của hạt tro trấu, dẫn đến việc hình thành nhiều lỗ rỗng mao quản trong ma trận vật liệu sau đóng rắn, làm giảm tính đặc chắc và tăng khả năng thẩm thấu.

Tuy nhiên, nồng độ chất hoạt hóa đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện nhược điểm này. Tại cùng một tỷ lệ cốt liệu, việc tăng

hàm lượng Na₂O từ 3,0 % lên 3,5 % giúp giảm đáng kể độ hút nước. Điều này được lý giải do môi trường kiềm cao thúc đẩy phản ứng Geopolymer hóa diễn ra hiệu quả hơn, tạo ra mạng lưới gel aluminosilicate liên tục giúp lấp đầy các lỗ rỗng vi mô, từ đó gia tăng độ đặc chắc và khả năng chống thấm cho sản phẩm.

Bảng 7. Kết quả độ hút nước của mẫu vữa Geopolymer (%).

STT	Ký hiệu mẫu	Tro trấu/ (tro trấu + tro bay)	Kết quả
1	A3	30 %	8,34
2	A4	40 %	9,53
3	A5	50 %	10,01
4	A6	60 %	11,21
5	A7	70 %	13,44
6	B3	30 %	6,32
7	B4	40 %	7,34
8	B5	50 %	9,33
9	B6	60 %	10,46
10	B7	70 %	12,43



Hình 7. Ảnh hưởng của RHA đến hút nước vữa Geopolymer.

4. Kết luận

Từ những kết quả thực nghiệm, một số kết luận trong bài nghiên cứu được rút ra như sau:

- Sự kết hợp giữa tro bay và tro trấu cần được cân đối hợp lý. Trong đó, hàm lượng tro trấu được khuyến nghị ở mức 30 % là tối ưu. Nếu hàm lượng tro trấu thay thế vượt quá ngưỡng này và đặc biệt trên 50 % sẽ gây suy giảm nghiêm trọng tính công tác và cường độ do cấu trúc xốp đặc trưng của vật liệu này.

- Tăng nồng độ Na₂O ở mức 3,5 % cho hiệu quả phản ứng Geopolymer hóa vượt trội hơn so với mức 3,0 %, giúp cải thiện cường độ nén, uốn và giảm độ hút nước vữa Geopolymer.

- Kết quả thực nghiệm cho thấy mẫu B3 (30 % tro trấu, 3,5 % Na₂O) được xác định là cấp phối hiệu quả nhất với độ xòe 154 mm, cường độ nén 24,3 MPa và độ hút nước 6,3 % tương đương mẫu xi

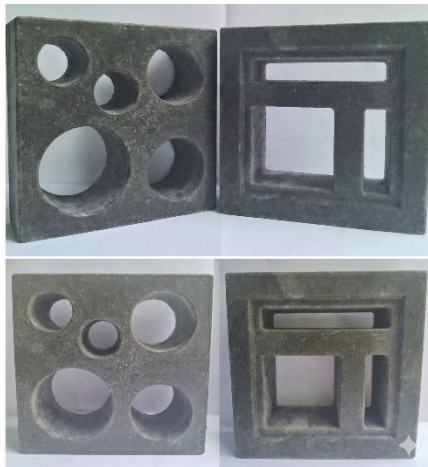
măng đối chứng, hoàn toàn phù hợp để ứng dụng thực tiễn cho các công trình kiến trúc xanh.

- Kết quả thử nghiệm cho thấy mẫu gạch bông gió được chế tạo từ cấp phối tối ưu đã đáp ứng hoàn toàn các chỉ tiêu kỹ thuật theo TCVN 6477:2016 được thể hiện Bảng 8. Đây là cơ sở thực tiễn quan

trọng để đề xuất thay thế vữa xi măng bằng vữa Geopolymer, hướng tới quy trình sản xuất gạch bông gió thân thiện với môi trường, tận dụng hiệu quả nguồn phế thải và cho thấy tiềm năng ứng dụng tốt trong sản xuất gạch bông gió và các cấu kiện thông gió không chịu lực phục vụ công trình kiến trúc xanh.

Bảng 8. Đánh giá ngoại quan gạch bông gió dựa vào TCVN 6477:2016 – Gạch bê tông.

STT	Chỉ tiêu đánh giá	Giới hạn	Đánh giá
1	Màu sắc, độ sắc nét hoa văn	Đồng đều cùng lô	Đạt
2	Kích thước và sai lệch - Chiều rộng - Chiều cao	± 2 mm ± 3 mm	Đạt
3	Độ cong vênh bề mặt	< 1 mm	Đạt
4	Số vết nứt vỡ ở các góc cạnh sâu (5 ÷ 10) mm, dài (10 ÷ 15)	0	Đạt
5	Viết nứt vỡ lớn (Sâu > 10 mm hoặc dài > 15 mm)	Không cho phép	Đạt
6	Số vết nứt có chiều dài đến 20 mm	0	Đạt
7	Vết nứt lớn (> 20 mm)	Không cho phép	Đạt



Hình 8. Sản phẩm thử nghiệm gạch bông gió sử dụng vữa Geopolymer.

Tài liệu tham khảo

[1]. McLellan, B., et al., Costs and carbon emissions for Geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. *Journal of Cleaner Production - J CLEAN PROD*, 2011. 19: p. 1080-1090.
 [2]. Davidovits, J., *Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications*. 2002.
 [3]. Davidovits, J., *False Values on CO2 Emission for Geopolymer Cement/Concrete*. 2015.
 [4]. Phoo-ngernkham, T., et al., A Mix Design Procedure for Alkali-Activated High Calcium Fly Ash Concrete Cured at Ambient Temperature. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
 [5]. Hadi, M.N.S., N.A. Farhan, and M.N. Sheikh, Design of Geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 2017.140: p. 424-431.

[6]. Liang, G., et al., Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based Geopolymer. *Construction and Building Materials*, 2019. 222: p. 872-881.
 [7]. Nuaklong, P., et al., Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash Geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 252: p. 119797.
 [8]. Owaid, S.A., R. Hamid, and M.R. Taha, The Effect of Rice Husk Ash Addition on the Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 2014. 580-583: p. 221-224.
 [9]. Lê Thanh Hà, Đặng Thùy Chi và Nguyễn Thị Thu Thủy, Nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia siêu dẻo đến tính chất của vữa Geopolyme sử dụng tro bay và xi lò cao. *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng*, 2025. 15(02): tr. 89-95.
 [10]. TCVN 3121-3:2022. Vữa xây dựng – Phương pháp thử – Phần 3: Xác định độ lưu động của vữa tươi bằng bàn dần. Tiêu chuẩn Việt Nam.
 [11]. TCVN 3121-11:2022. Vữa xây dựng – Phương pháp thử – Phần 11: Xác định cường độ uốn và cường độ nén của vữa đóng rắn. Tiêu chuẩn Việt Nam.
 [12]. TCVN 3113:2022. Bê tông - Phương pháp xác định độ hút nước. Tiêu chuẩn Việt Nam.
 [13]. Ojedokun, O. and P. S. Mangat, Characterization and Pore Structure of Rice Husk Ash Cementitious Materials. In *Durability and Sustainability of Rice Husk Ash Cementitious Materials*, American Concrete Institute, 2018
 [14]. Naveen, et al., Effect of Rice Husk on Flexural Strength of Concrete. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER)*, 2017. 5(4): p. 313-317
 [15]. Ratag, E., The Effect of Rice Husk Ash Addition on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Engineering and Technology Journal*, 2024. 9(9): p. 5207-5210.
 [16]. Singh, N. S., Thokchom, S., & Debbarma, R. (2021). Properties of fly ash and rice husk ash blended Geopolymer with sodium aluminate as activator solution. *Engineering and Applied Science Research*, 48(1), 92-101.
 [17]. Karim, M. R., Zain, M. F. M., Jamil, M., and Aziz, F. N. A., Strength development in concrete with high volume palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 2012. 30: p. 361-367