■Ngày nhận bài: 25/10/2024 ■Ngày sửa bài: 26/11/2024 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/01/2025

Nghiên cứu tính chất của vữa geopolymer gốc tro bay kết hợp với tro bã mía

Study on properties of fly ash-based geopolymer mortar combined with sugarcane bagasse ash

> **VÕ VĂN THẢO, LÊ ĐỨC HIỂN, PHAN TÔ ANH VŨ*, NGÔ MẠCH VĨNH THUẬN, TRẦN CÔNG NAM, HỒ THỊ CẨM TÚ**
Khoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Tôn Đức Thắng TP.HCM
*Email: phantoanhvu@tdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu sản xuất vật liệu địa trùng hợp như một giải pháp giảm phát thải CO_2 từ ngành xi măng Portland, góp phần xây dựng bền vững. Biến đổi khí hậu và hiện tượng nóng lên toàn cầu là động lực chính để nghiên cứu vật liệu địa trùng hợp. Bài báo này đánh giá ảnh hưởng của tro bã mía (SCBA) đến các tính chất của vữa địa trùng hợp gốc tro bay có hàm lượng canxi thấp. Năm hỗn hợp vữa địa trùng hợp đã được chế tạo bằng cách thay thế tro bay bằng SCBA ở mức 0%, 5%, 10%, 15% và 20% theo khối lượng. Ngoài ra, một hỗn hợp vữa xi măng Porland đã được chuẩn bị để so sánh. Các cuộc điều tra thực nghiệm tập trung vào việc đánh giá khối lượng thể tích khô, khả năng hấp thụ nước, độ xốp, cường độ nén, cường độ uốn của các mẫu. Kết quả chỉ ra rằng vữa địa trùng hợp thể hiện các tính chất cơ học vượt trội so với vữa xi măng Porland. Bổ sung 5%-10% SCBA theo khối lượng vào hỗn hợp địa trùng hợp được xác định là tỷ lệ phù hợp, đạt được cường độ nén và độ bền cao. Hơn nữa, nghiên cứu đã tìm thấy mối tương quan giữa các đặc tính của vữa thu được và thành phần hóa học và hình thái của vật liệu ban đầu. Những phát hiện này làm nổi bật tiềm năng của SCBA như một tiền chất có lợi trong hỗn hợp geopolymer, tăng cường cả tính bền vững về môi trường và hiệu suất của vật liệu xây dựng.

Từ khóa: Tro bã mía; tro bay; tính chất vật lý; tính chất cơ học; vữa geopolymer.

ABSTRACT

Research on the production of geopolymer materials as a solution to reduce CO_2 emissions from the Portland cement industry, contributing to sustainable construction. Climate change and global warming are the main drivers behind researching geopolymer materials. This paper evaluates the influence of sugarcane bagasse ash (SCBA) on the properties of low-calcium fly ash-based geopolymer mortar. Five geopolymer mortar mixtures were prepared by replacing fly ash with SCBA at 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by weight. Additionally, a Porland cement mortar mixture was prepared for comparison. The experimental investigations focused on evaluating dry density, water absorption, porosity, compressive strength, and flexural strength of the samples. The results indicate that geopolymer mortar exhibits superior mechanical properties compared to Portland cement mortar. Adding 5-10% SCBA by weight into the geopolymer mixture was identified as the optimal ratio, achieving high compressive strength and durability. Furthermore, the study found a correlation between the properties of the resulting mortar and the chemical composition and morphology of the initial materials. These findings highlight the potential of SCBA as a beneficial precursor in geopolymer mixtures, enhancing both environmental sustainability and the performance of construction materials.

Keywords: Sugarcane bagasse ash; fly ash; physical properties; mechanical properties; geopolymer mortar.

1. GIỚI THIỆU

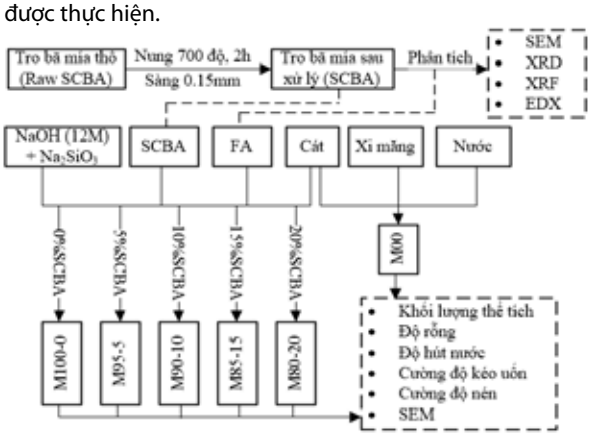
Từ năm 2013, sản lượng xi măng duy trì khoảng 4 tỷ tấn, tăng gấp ba so với năm 1995 [1]. Mỗi tấn xi măng phát thải một tấn CO_2 [2], chiếm 8% khí CO_2 toàn cầu [3]. Trung Quốc, Ấn Độ và Việt Nam có lượng phát thải cao [4]. Để giảm tác động môi trường, cần tìm vật liệu thay thế xi măng, góp phần vào mục tiêu xây dựng bền vững.

Geopolymer là chất kết dính được tạo thành từ chuỗi phản ứng giữa vật liệu giàu silic và nhôm (gọi là tiền chất) với dung dịch kiềm [5]. Quá trình này gọi là "địa trùng hợp" và trải qua ba giai đoạn chính: (1) phá hủy - đông tụ, (2) đông tụ - ngưng tụ, (3) ngưng tụ - kết tinh [6]. Theo Joseph Davidovits, sản phẩm của quá trình địa trùng hợp là liên kết Si - O - Al (gọi là sialate) được tạo thành, mạng lưới không gian là "Poly -sialate" có cấu trúc bền vững tạo cường độ của geopolymer [7]. So với xi măng, geopolymer có đặc tính cơ học và độ bền vượt trội [8]. Trong xây dựng, geopolymer được thay thế xi măng và có ứng dụng đa dạng: bê tông, vữa, gia cố nền, vật liệu chống cháy…dẫn đến geopolymer thay xi măng là giải pháp hữu hiệu [9].

Tro bay (FA) là sản phẩm phụ của quá trình đốt than đá trong các nhà máy nhiệt điện. Thành phần hóa học chủ yếu của tro bay: SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO [10]. Với sản lượng khoảng 500 triệu tấn [11]. Tro bay là vật liệu quen thuộc trong geopolymer [12]. Gần đây, các nghiên cứu về geopolymer quan tâm đến tái chế chất thải nông nghiệp bụi mịn như tro

trấu, tro bã mía, tro vỏ dừa, tro rơm lúa mì… đã thu được những kết quả khả quan [13]. SCBA sinh ra từ nhiệt điện lò hơi ở các nhà máy đường. Khối lượng tro bã mía toàn cầu khoảng 12 triệu tấn [14]. Ahmad và cộng sự đã đánh giá toàn diện những ảnh hưởng của SCBA đến môi trường và các lợi ích của tái chế tro bã mía trong xây dựng bền vững [15]. Tuy nhiên, chỉ sử dụng SCBA trong vai trò tiền chất để tổng hợp geopolymer không khả thi khi cường độ vật liệu thu được thấp [16, 17]. Do đó, trong các nghiên cứu trước đây, SCBA thường được thay thế một phần FA để tạo geopolymer. Bổ sung SCBA vào bê tông địa trùng hợp tro bay mang lại một phương pháp đầy hứa hẹn để tạo ra vật liệu xây dựng bền vững [18]. Bê tông bọt địa trùng hợp gốc FA-SCBA có thể được sử dụng làm vật liệu cách nhiệt [19]. SCBA làm giảm tính thi công và cường độ của bê tông geopolymer gốc tro bay. Tuy nhiên, bổ sung 10% khối lượng SCBA ảnh hưởng được giảm thiểu [20]. Rihan và cộng sự báo cáo rằng với nồng độ kiềm cao, SCBA có thể cải thiện cường độ của bê tông [21]. Bổ sung SCBA đã cải thiện cấu trúc vi mô, tăng cường mật độ của gel trong cấu trúc geopolymer [22]. Lê Đức Hiển và cộng sự đã nghiên cứu vật liệu kiềm hoạt hóa SCBA và xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) với cường độ, tính co ngót và độ bền tuyệt vời [23]. (50% GGBFS + 30% FA + 20% SCBA) là tỷ lệ tối ưu để bê tông đạt được cường độ [24].

Từ những nghiên cứu trên phát hiện rằng việc đưa một lượng lớn SCBA vào geopolymer có thể làm giảm khả năng thi công và cường độ. Tỷ lệ thay thế tro bay tối ưu là 5-10% để đạt được hiệu quả độ bền tối đa hoặc để giảm tác động không có lợi. Nguồn nguyên liệu và công nghệ đốt đã ảnh hưởng đến đặc tính của tro bã mía [25]. Xử lý tro bã mía trước khi sử dụng làm thay đổi thành phần ôxít, độ mịn, ảnh hưởng đáng kể đến tính chất của vật liệu thu được [26]. Ở Việt Nam, mía là cây trồng truyền thống, có diện tích khoảng 127.000 ha và khoảng 7,5 triệu tấn [27]. Giải quyết bụi phát thải từ SCBA tại các nhà máy đường là vấn đề cấp bách [28]. Do đó, làm sáng tỏ các tính chất vật lý và hóa học của SCBA được sản xuất tại các nhà máy đường ở Việt Nam và nghiên cứu tiềm năng tái chế tro bã mía trong vật liệu geopolymer là cần thiết. Trong nghiên cứu này, SCBA được thu thập từ một nhà máy đường trong nước và được phân tích thành phần hóa học, thành phần nguyên tố, các đặc trưng về hình dạng và thành phần khoáng. SCBA thay thế tro bay đến 20% khối lượng nhằm đánh giá ảnh hưởng của SCBA đến tính chất cơ học và độ bền của vữa. Dung dịch kiềm và điều kiện bảo dưỡng được cố định. Nghiên cứu được thực hiện ở phòng thí nghiệm công trình của Trường đại học Tôn Đức Thắng. **Hình 1.** Mô tả sơ đồ nghiên cứu được thực hiện.

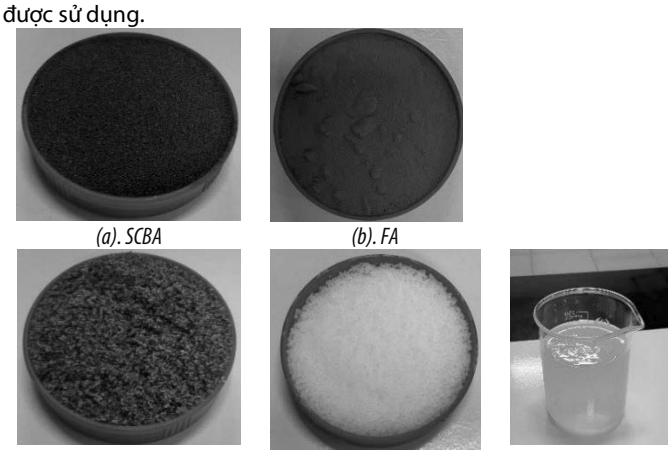


Hình 1. Sơ đồ nghiên cứu

2. VẬT LIỆU VÀ CHẾ TẠO MẪU

2.1. Vật liệu

Tro bã mía từ nhà máy đường Sóc Trăng được xử lý ở 110°C để loại bỏ độ ẩm, sau đó nung ở 700°C trong 2 giờ và sàng qua 150µm để loại bỏ các thành phần chưa cháy và hạt lớn, tăng khả năng phản ứng [26]. Sau khi xử lý, SCBA có màu xám và hạt mịn, với khối lượng thể tích và khối lượng riêng lần lượt là 0,74 g/cm^3 và 2,15 g/cm^3. Tro bay từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải 3 có màu vàng đậm. Trước khi sử dụng, FA được sàng qua sàng 315µm để loại bỏ những hạt bị vón, khối lượng thể tích khô và khối lượng riêng là 1,58 g/cm^3 và 2,72 g/cm^3. Xi măng (OPC) là loại PC40 loại I với cường độ ≥ 40N/mm^2 và khối lượng riêng 3,10 g/cm^3. Cát sông sạch, có độ ẩm < 0.5%, khối lượng riêng 2,67 g/cm^3, modun độ lớn 2,35 và phân bố thành phần hạt theo ASTM C33/C33M-18 [29]. Dung dịch kiềm hoạt hóa gồm natri hydroxit (NaOH) và natri silicate (Na_2SiO_3). NaOH có nồng độ 12M, được pha từ viên NaOH tinh khiết 98% và nước máy. Na_2SiO_3 có 9% Na_2O, 28% SiO_2, và 63% H_2O. **Hình 2.** Thể hiện các vật liệu được sử dụng.



(a). SCBA *(b). FA*

(c). Cát *(c). Cát* *(e). Na_2SiO_3*

Hình 2. Vật liệu sử dụng

2.2. Thành phần hỗn hợp

Thành phần vữa được thiết lập theo ASTM C 109/C 109M [30]. vữa xi măng (M00) gồm: Nước/Xi măng = 0,485; Cát/Xi măng = 2,75. Trong vữa geopolymer, dung dịch kiềm làm nước và tro bay, tro bã mía làm xi măng, tỷ lệ: (NaOH + Na_2SiO_3)/(FA + SCBA) = 0,485; Cát/(FA + SCBA) = 2,75. Tỷ lệ Na_2SiO_3 và NaOH cố định ở 2,5 để cân bằng tính chất và giá thành [31, 32]. SCBA thay thế FA từ 0-20%. Khối lượng vật liệu được thể hiện ở **Bảng 1.**

Bảng 1. Thành phần vật liệu các hỗn hợp vữa (1000 gam vữa).

Ký hiệu mẫu	OPC	Cát	Nước	FA	SCBA	NaOH	Na_2SiO_3
M00	236.2	649.5	114.3	-	-	-	-
M100-0	-	649.5	-	236.2	0.0	32.7	81.7
M95-5	-	649.5	-	224.4	11.8	32.7	81.7
M90-10	-	649.5	-	212.6	23.6	32.7	81.7
M85-15	-	649.5	-	200.8	35.4	32.7	81.7
M80-20	-	649.5	-	188.9	47.2	32.7	81.7

2.3. Chế tạo mẫu

Dung dịch natri hydroxit từ NaOH rắn được pha chế trước 24 giờ để đảm bảo hòa tan hoàn toàn và loại bỏ ảnh hưởng của nhiệt độ. NaOH và Na_2SiO_3 được khuấy đều. FA và SCBA được trộn theo tỷ lệ rồi trộn với cát. Sau đó, dung dịch kiềm được thêm vào và trộn đều trong 3 phút bằng máy trộn vữa [30]. Hỗn hợp sau đó được đúc vào khuôn 40mmx40mmx160mm. Mẫu vữa xi măng được bảo dưỡng ở nhiệt độ 23°C ± 2°C trong 24 giờ, sau đó tháo khuôn và ngâm trong nước vôi 7 ngày. Vữa geopolymer sau khi đúc được bao bọc và sấy ở 90°C trong 24 giờ. Sau khi hoàn thành quá trình bảo dưỡng, các mẫu được lưu giữ ở nhiệt độ phòng. Quá trình này được mô tả chi tiết trong **Hình 3.**

3. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

3.1. Phân tích đặc tính lý hóa của tro bay, tro bã mía

Để phân tích thành phần hóa học và cấu trúc vi mô của FA và SCBA, các thí nghiệm XRF, EDX, XRD và SEM được tiến hành. Thí nghiệm XRF (X-ray Fluorescence) được thực hiện bằng thiết bị S2 PUMA Series 2 Bruker (Đức) và phần mềm SPECTRA.ELEMENTS. Mẫu tro sau khi nghiền mịn được tia X chiếu vào, kích thích các nguyên tử phát ra bức xạ đặc trưng. Phần mềm này phân tích bức xạ để xác định thành phần hóa học của mẫu. Phân tích EDX (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) sử dụng thiết bị H-7593 của Horiba (Anh) và phần mềm EMAX-Analyser. Mẫu tro bị chiếu tia điện tử, kích thích các nguyên tử trong mẫu phát ra bức xạ X đặc trưng. Máy EDX thu nhận và phần mềm phân tích bức xạ để xác định thành phần nguyên tố. Thí nghiệm XRD (X-ray Diffraction) sử dụng thiết bị X'PERT PRO diffractometer của PANalytical (Vương quốc Anh). Mẫu tro được nghiền mịn, chiếu tia X và tạo ra mẫu nhiễu xạ đặc trưng. Máy XRD phân tích để xác định cấu trúc tinh thể và các pha khoáng. Thí nghiệm SEM (Scanning Electron Microscopy) được thực hiện bằng kính hiển vi điện tử quét Hitachi S-4800 FESEM (Nhật Bản). Mẫu vật liệu được phủ lớp dẫn điện mỏng và quét tia điện tử, tạo ra hình ảnh chi tiết về bề mặt và cấu trúc vi mô của mẫu, cung cấp thông tin về hình thái học, kích thước hạt và cấu trúc bề mặt của FA và SCBA.

3.2. Khối lượng thể tích khô, độ xốp, độ hấp thụ nước

Tiêu chuẩn BS EN 1015-10 và BS EN 1015-18 được vận dụng cho các thí nghiệm này [33, 34]. Mẫu vữa sau 28 ngày đúc được sấy ở 105°C đến khối lượng không đổi, cân mẫu khô (M_1). Tiếp theo, ngâm mẫu trong nước ở 20°C trong 24 giờ để bão hòa nước, lau sạch bề mặt và cân (M_2). Cân mẫu bão hòa trong nước (M_3). Kết quả lấy trung bình cho 3 mẫu. Khối lượng thể tích khô (D), độ xốp (P), độ hấp thụ nước (W) được xác định lần lượt theo công thức (1) – (3):

$$D\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{M_1}{M_2 - M_3} \quad (1)$$

$$P(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_3} \quad (2)$$

$$W(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (3)$$

3.3. Cường độ kéo uốn và cường độ nén

Quá trình thí nghiệm uốn và nén mẫu được thực hiện trên máy nén uốn chuyên dụng Utest (Thổ Nhĩ Kỳ) có lực nén tối đa 500Kn ở 28 ngày. Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện ở **Hình 4.** Quá trình thí nghiệm cường độ uốn theo ASTM C348 - 02 [35], tốc độ gia tải 25N/giây. R_u (MPa) là giá trị trung bình cộng của 3 mẫu theo công thức (4):

$$R_u = 1{,}5\frac{P_u l}{bh^2} \quad (4)$$

Trong đó:

P_u: lực uốn gãy (N).

l: khoảng cách giữa hai gối uốn, l = 100 (mm).

b, h: bề rộng và chiều cao mẫu thử, b = h = 40 (mm).

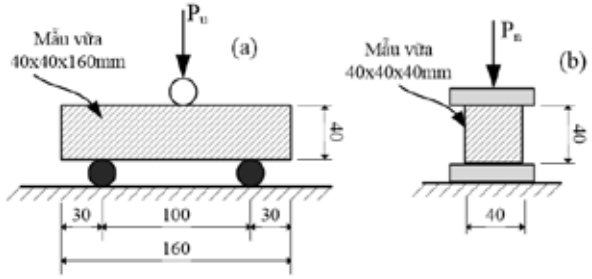
Thí nghiệm cường độ nén được tiến hành với mẫu uốn đã gãy. Tiêu chuẩn ASTM C109 [30] được áp dụng. Tốc độ gia tải được thiết lập 100N/s. Kết quả thử là giá trị trung bình của 6 mẫu, R_n (MPa) xác định theo công thức (5):

$$R_n = \frac{P_n}{A} \quad (5)$$

Trong đó:

P_n: lực nén phá hủy mẫu (N).

A: diện tích nén của mẫu (mm^2).



Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm uốn (a) và nén (b) mẫu vữa

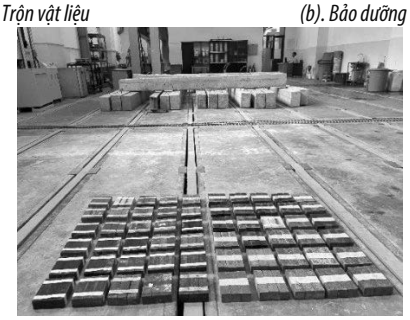
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Đặc tính của tro bay và tro bã mía

Phân tích EDX cho thấy sự khác biệt về thành phần nguyên tố của FA và SCBA. FA chứa sắt (Fe), canxi (Ca), silic (Si), nhôm (Al) và magie (Mg). SCBA chứa cacbon (C), oxy (O), magie (Mg), nhôm (Al), silic (Si), kali (K) và canxi (Ca). Cả hai loại tro đều có silic và nhôm, thích hợp cho tổng hợp geopolymer. SCBA có hàm lượng cacbon cao hơn có thể ảnh hưởng đến tính chất của vật liệu. **Bảng 2** so sánh thành phần ôxít của OPC, FA và SCBA từ phân tích XRF. OPC có hàm lượng CaO cao (62,7%), so với FA (5,15%) và SCBA (1,11%). FA chứa 55,28% SiO_2, trong khi SCBA có 84,75% SiO_2, cho thấy hàm lượng silica phong phú. Al_2O_3 nhiều nhất trong FA (20,33%), so với OPC (6,72%) và SCBA (2,12%). Fe_2O_3 cao nhất trong FA (12,27%), so với OPC (3,11%) và SCBA (1,28%). FA có hàm lượng CaO 5,15% được phân loại là FA ít canxi (loại F) [10]. Quá trình nung lại và sàng SCBA làm giảm lượng mất khi nung (LOI).

(a). Trộn vật liệu

(b). Bảo dưỡng mẫu

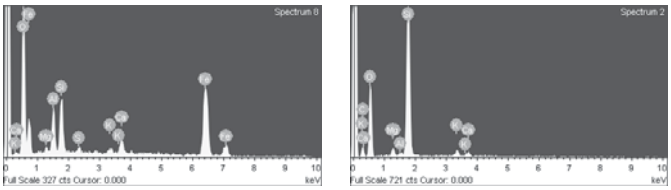


(c). Mẫu 40mmx40mmx160mm

Hình 3. Quá trình đúc và bảo dưỡng mẫu

Bảng 2. Thành phần ôxít của vật liệu

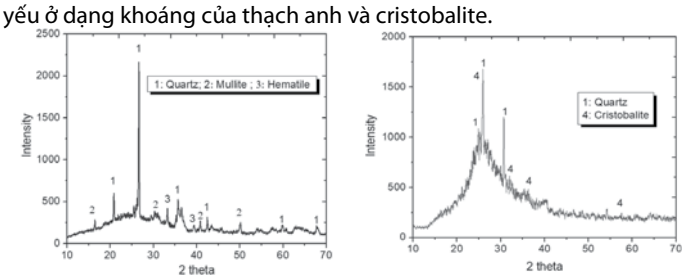
Thành phần ôxít (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	SO_3	P_2O_5	LOI (%)
OPC	23,27	6,72	3,11	62,7	0,15	0,52	1,18	1,48	-	1,83
FA	55,28	20,33	12,27	5,15	0,52	1,98	1,15	1,54	0,58	1,63
SCBA	84,75	2,12	1,28	1,11	0,49	1,68	3,45	0,58	3,07	5,23



(a). Kết quả EDX của FA *(b). Kết quả EDX của SCBA*

Hình 5. Kết quả phân tích EDX

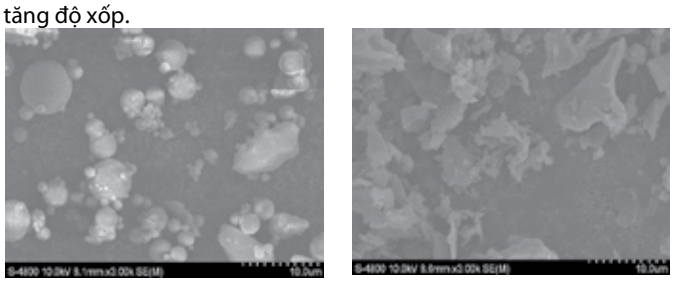
Kết quả phân tích XRD cho thấy thành phần tinh thể riêng biệt của vật liệu ở **Hình 6**. FA có các đỉnh đáng kể của thạch anh (SiO_2) quanh 26°, mullite ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$) và hematit (Fe_2O_3), cho thấy cấu trúc khoáng vật phức tạp với nồng độ cao của silica và alumina. SCBA có các đỉnh rõ của thạch anh (SiO_2) và cristobalite (SiO_2), làm nổi bật hàm lượng silica phong phú và sự vắng mặt của oxit sắt. Thành phần của SCBA chủ yếu là pha silica, đơn giản hơn so với thành phần khoáng vật đa dạng của FA. Kết quả XRD phù hợp với phân tích EDX và XRF, cho thấy hàm lượng cao SiO_2 trong SCBA chủ yếu ở dạng khoáng của thạch anh và cristobalite.



(a). Kết quả XRD của FA *(b). Kết quả XRD của SCBA*

Hình 6. Kết quả phân tích XRD

Hình 7 thể hiện kết quả phân tích SEM, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hình thái của FA và SCBA. FA gồm các hạt hình cầu với bề mặt nhẵn và kích thước khác nhau, đặc trưng cho quá trình đốt than nhanh. Các hạt này giúp cải thiện tính làm việc và giảm nhu cầu nước trong hỗn hợp. Ngược lại, SCBA gồm các hạt không đều với bề mặt thô và xốp, chịu ảnh hưởng từ bản chất hữu cơ của nó. Hạt tro bã mía lớn hơn nhiều lần và thô, xốp, có khả năng hấp thụ chất lỏng, tăng độ xốp.



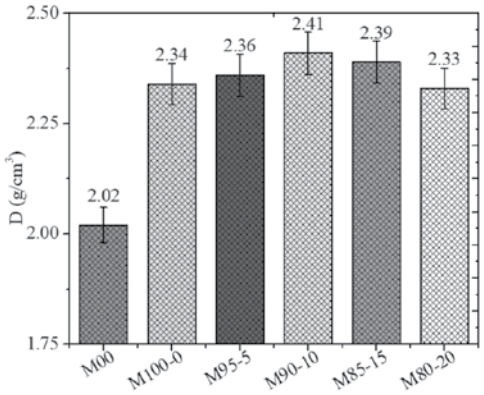
(a). FA *(b). SCBA*

Hình 7. Kết quả phân tích SEM

Từ kết quả phân tích đặc tính lý hóa nhận thấy SCBA với thành phần chủ yếu là SiO_2 tồn tại ở dạng khoáng thạch anh và cristobalite có cấu trúc bền vững. Hạt tro bã mía có dạng ống, thô và xốp. Những đặc tính này có thể ảnh hưởng bất lợi đến phản ứng với dung dịch kiềm [18, 22].

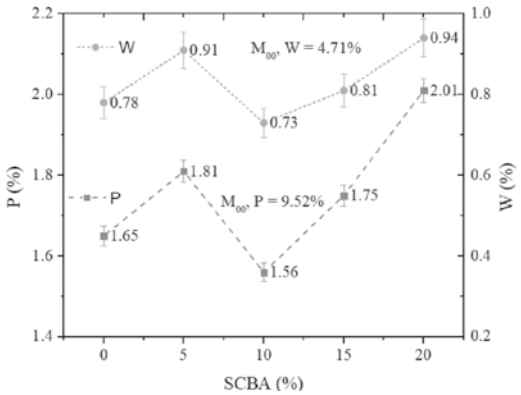
4.2. Khối lượng thể tích khô, độ xốp và độ hấp thụ nước

Hình 8 thể hiện kết quả thử nghiệm khối lượng khô. Kết quả cho thấy sự thay đổi rõ rệt chịu ảnh hưởng của việc kết hợp SCBA. Mẫu vữa OPC (M00) cho thấy tỷ trọng khô thấp nhất. Trong số các vữa geopolymer, mẫu M100-0 cho thấy tỷ trọng khô tương đối cao. Bổ sung SCBA, tỷ trọng khô ban đầu tăng. Đáng chú ý, mẫu có 10% SCBA đạt được tỷ trọng khô cao nhất, cho thấy tỷ lệ này tối ưu hóa tỷ trọng và tính toàn vẹn về cấu trúc vi mô. Tuy nhiên, SCBA tăng, tỷ trọng khô giảm. Sự suy giảm tỷ trọng này ở mức SCBA cao hơn có thể là do bản chất nhẹ của SCBA và khả năng tạo ra ma trận xốp [22]. Những kết quả này làm nổi bật mối quan hệ phức tạp giữa hàm lượng SCBA và các tính chất vật lý của vữa, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc cân bằng lượng SCBA để đạt được hiệu suất tối ưu [20].



Hình 8. Khối lượng thể tích khô

Độ hấp thụ nước (W) và độ rỗng (P) của các mẫu được thể hiện ở **Hình 9**. Mẫu M00 có giá trị cao nhất về cả độ xốp và độ hấp thụ nước, cho thấy cấu trúc thấm hơn và ít đặc hơn so với vữa địa trùng hợp. Trong số các vữa địa trùng hợp, mẫu M100-0 có độ xốp và độ hấp thụ nước tương đối thấp. Khi SCBA được đưa vào (5% SCBA), ban đầu cả hai tính chất đều tăng lên nhưng sau đó giảm mạnh khi bổ sung 10% SCBA. Mẫu có 20% SCBA (M80-20) có độ xốp và độ hấp thụ nước cao nhất, cho thấy mức SCBA cao hơn dẫn đến tăng lỗ rỗng và mao dẫn. Xu hướng này có thể là do sự phá vỡ ma trận địa trùng hợp từ việc bổ sung các hạt SCBA, ảnh hưởng đến mật độ và độ chặt tổng thể [18]. Tuy nhiên, các mẫu có hàm lượng SCBA thấp hơn, chẳng hạn như M95-5, cho thấy độ xốp và khả năng hấp thụ nước cân bằng, cho thấy mức tối ưu mà SCBA đóng góp tích cực vào cấu trúc ma trận mà không làm tăng đáng kể độ thấm.

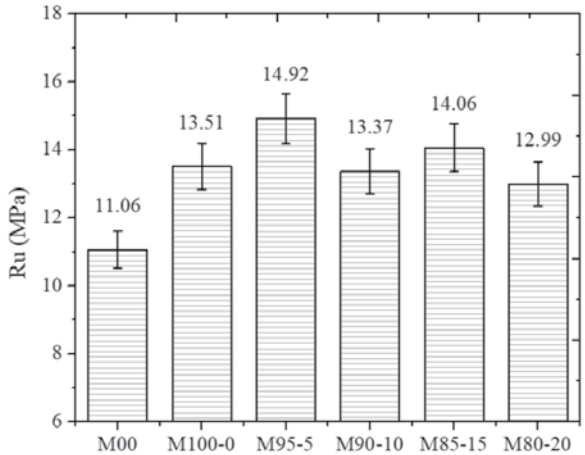


Hình 9. Độ xốp và độ hấp thụ nước

4.3. Cường độ

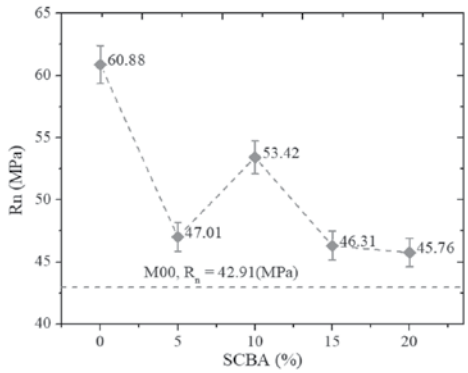
Kết quả thử nghiệm cường độ uốn (Ru) được trình bày ở **Hình 10**. cho thấy sự thay đổi đáng kể giữa các mẫu vữa do bổ sung tro bã mía. Mẫu M00 thể hiện Ru thấp nhất. Trong số các vữa geopolymer, mẫu M100-0 cho thấy độ bền uốn tương đối cao. Đưa SCBA vào ban đầu dẫn đến sự gia tăng Ru, với mẫu chứa 5% SCBA cho thấy độ bền uốn cao nhất, vượt qua cả mẫu M100-0 và mẫu xi măng Portland. Điều này cho thấy hoạt động puzzolan của SCBA và tác động của SCBA lên ma trận geopolymer góp phần tích cực vào các tính chất cơ học. Tuy nhiên, khi hàm lượng SCBA tăng lên quá 5%, độ bền uốn bắt đầu giảm. Mẫu có 10% SCBA cho thấy Ru giảm, sau đó là sự phục hồi nhẹ trong mẫu có 15% SCBA, vẫn cho thấy hiệu suất mạnh nhưng không cao bằng M95-5. Cuối cùng, mẫu có

20% SCBA (M80-20) cho thấy Ru giảm thêm. Kết quả này có thay đổi nhỏ so với nghiên cứu của Mohammed Ali M. Rihan và cộng sự [21]. Xu hướng chỉ ra rằng trong khi lượng SCBA vừa phải có thể tăng cường độ uốn của vữa, hàm lượng SCBA quá mức có thể dẫn đến liên kết yếu hơn và tăng độ xốp, làm giảm cường độ tổng thể [18].



Hình 10. Cường độ uốn

Hình 11 mô tả kết quả thử nghiệm cường độ nén (Rn) đối với các mẫu vữa. Mẫu vữa OPC có cường độ nén nhỏ nhất. Trong số các vữa geopolymer, mẫu M100-0 thể hiện Rn cao nhất, cho thấy cường độ vốn có của vữa geopolymer gốc tro bay [18]. Đưa SCBA vào ban đầu dẫn đến giảm cường độ nén. Điều thú vị là mẫu có 10% SCBA cho thấy Rn được cải thiện, tỷ lệ cụ thể này tối ưu hóa hỗn hợp bằng cách tăng cường phản ứng puzzolan và mang lại tính toàn vẹn về mặt cấu trúc tốt hơn [23]. Tuy nhiên, việc tăng thêm hàm lượng SCBA dẫn đến giảm cường độ nén, với các mẫu M85-15 và M80-20. Xu hướng này nhấn mạnh rằng SCBA quá mức có thể tạo ra nhiều lỗ rỗng hơn và làm yếu các liên kết giữa các hạt trong ma trận geopolymer [19, 21]. Ảnh hưởng của tro bã mía đến cường độ vữa có thể liên quan đến hình thái khoáng vật của SCBA. Kết quả phân tích XRD của SCBA cho thấy SiO_2 chủ yếu tồn tại dưới dạng pha tinh thể thạch anh và cristobalite (**Hình 6**). Tinh thể SiO_2 có cấu trúc bền vững và không tan trong dung dịch kiềm. Từ đó dẫn đến cường độ nén giảm [20].

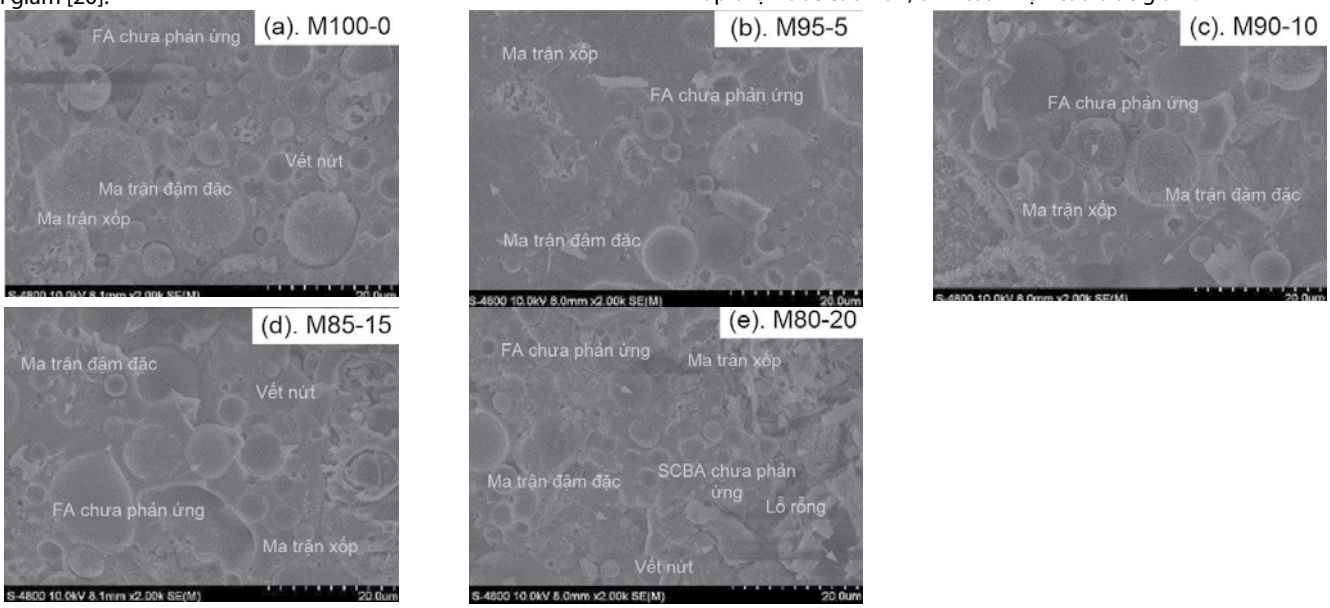


Hình 11. Cường độ nén

Cường độ của các mẫu vữa geopolymer thể hiện giá trị lớn hơn mẫu vữa OPC. Kết quả gợi ý rằng SCBA có thể thay thế đến 20% khối lượng FA trong hỗn hợp geopolymer để chế tạo vật liệu có khả năng ứng dụng. Ngoài ra, cường độ uốn của vữa geopolymer chứa SCBA tương đương hoặc lớn hơn mẫu vữa chỉ chứa FA đã thể hiện vai trò của SCBA trong tăng cường khả năng chịu kéo.

4.4. Kết quả thí nghiệm SEM

Tính chất của vật liệu liên quan mật thiết đến cấu trúc bề mặt của vữa. Mẫu có bề mặt nhẵn và đậm đặc thường có cường độ và khối lượng thể tích cao [20]. Ngược lại, bề mặt xốp với vết nứt và vật liệu chưa phản ứng có độ hấp thụ nước và độ rỗng lớn [22]. Để đánh giá tác động của SCBA đến vữa, phân tích SEM được thực hiện, và cấu trúc vi mô các mẫu vữa được thể hiện ở **Hình 12.** Mẫu M100-0 (Hình 12.a) có bề mặt nhẵn, ít lỗ rỗng và vết nứt, tương quan với mật độ khô cao, khả năng hấp thụ nước thấp và tính chất cơ học mạnh. Mẫu M95-5 (Hình 12.b) với bề mặt hơi nhám. SCBA hoạt động như chất độn, tăng cường độ chặt và liên kết ma trận, cường độ uốn (Ru) cực đại, dù độ xốp và hấp thụ nước tăng nhẹ. Mẫu M90-10 (Hình 12.c) thể hiện cấu trúc vi mô tối ưu với các hạt sắp xếp chặt chẽ, ít lỗ rỗng, đạt mật độ khô và cường độ nén (Rn) cao nhất, do phản ứng puzzolan hiệu quả tạo pha liên kết bổ sung. Mẫu M85-15 (Hình 12.d) co độ nhám tăng, lỗ rỗng rõ, Ru và Rn giảm do phá vỡ ma trận. Mẫu M80-20 (Hình 12.e) với bề mặt xốp và nứt, mật độ khô và độ bền cơ học giảm đáng kể, độ xốp cao và lỗ rỗng lớn làm gián đoạn ma trận, hấp thụ nước cao hơn, tính toàn vẹn cấu trúc giảm.



Hình 12. Hình SEM các mẫu vữa

5 KẾT LUẬN

Một số kết luận của nghiên cứu này:

Tro bã mía chứa SiO_2 ở dạng thạch anh và cristobalite, cùng các nguyên tố như carbon, oxy, magiê, nhôm, kali và canxi. Hạt SCBA không đều, bề mặt thô và xốp, theo phân tích SEM, ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ nước và tính chất cơ học.

Việc kết hợp SCBA ảnh hưởng mạnh đến vữa địa trùng hợp tro bay. Khối lượng thể tích khô tăng ở mức SCBA 10%, sau đó giảm khi hàm lượng cao hơn do SCBA nhẹ. Độ xốp và khả năng hấp thụ nước ban đầu tăng, rồi giảm ở hàm lượng cao hơn nhờ hoạt động puzolan. Tối ưu hóa hàm lượng SCBA là cần thiết để cải thiện độ bền và khả năng thấm.

Độ bền uốn và nén cải thiện tối đa khi thay thế 5%-10% SCBA. Tuy nhiên, hàm lượng SCBA cao hơn làm yếu liên kết hạt và tăng độ xốp, giảm độ bền. Tối ưu ở mức 10% SCBA.

Tính chất của vữa geopolymer thu được có mối liên hệ chặt chẽ với cấu trúc bề mặt thông qua thí nghiệm SEM. Mẫu vữa được bổ sung 5-10% SCBA có bề mặt nhẵn, đậm đặc thể hiện cường độ cao và độ xốp, độ hấp thụ nước thấp.

Tóm lại, SCBA là vật liệu bổ sung có giá trị cho vữa địa trùng hợp bền vững. Nghiên cứu nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tối ưu hóa hàm lượng SCBA để đạt được mật độ, độ xốp, khả năng hấp thụ nước, cường độ uốn và nén cân bằng. Bổ sung SCBA ở mức độ vừa phải có lợi, nhưng tỷ lệ cao hơn có thể giảm đặc tính cấu trúc, ảnh hưởng đến tính phù hợp cho xây dựng. Phát hiện này quan trọng để phát triển vật liệu xây dựng bền vững từ sản phẩm phụ nông nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Production volume of cement worldwide from 1995 to 2022.* https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/ 2023.

2. Berenguer, R., et al., *Durability of Concrete Structures with Sugar Cane Bagasse Ash.* Advances in Materials Science and Engineering, 2020. **2020**.

3. Guo, Y., et al., *A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry.* Journal of Environmental Sciences, 2024. **136**: p. 682-697.

4. https://www.statista.com/statistics/1091672/carbon-dioxide-emissions-global-cement-manufacturing/. *Carbon dioxide emissions from the manufacture of cement worldwide in from 1990 to 2021, by select country* 2023.

5. Gluchovskij, V.D.G., *Gosstrojizdat Kiev, Patent USSR 245 627 (1967), Patent USSR 449894 (Patent application 1958, granted 1974) (1959).*

6. Duxson, P., et al., *Geopolymer Technology: The Current State of the Art.* Journal of Materials Science, 2007. **42**: p. 2917-2933.

7. Davidovits, J., *Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1991. **37**: p. 1633-1656.

8. Castillo, H., et al., *State of the art of geopolymers: A review.* e-Polymers, 2022. **22**(1): p. 108-124.

9. Nawaz, M., A. Heitor, and M. Sivakumar, *Geopolymers in construction - recent developments.* Construction and Building Materials, 2020. **260**: p. 120472.

10. *ASTM C618-23. Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. 2023.

11. *The global fly ash market size.* https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/fly-ash-market-101087. 2023.

12. Sbahieh, S., G. McKay, and S.G. Al-Ghamdi, *Comprehensive Analysis of Geopolymer Materials: Properties, Environmental Impacts, and Applications.* 2023. **16**(23): p. 7363.

13. Alaneme, G., K. Olonade, and E. Esenogho, *Eco-friendly agro-waste based geopolymer-concrete: a systematic review.* Discover Materials, 2023. **3**.

14. Abdalla, T.A., et al., *Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash – A review of 15 years of perspectives, progress and future insights.* Results in Engineering, 2024. **21**: p. 101764.

15. Ahmad, W., et al., *Sustainable approach of using sugarcane bagasse ash in cement-based composites: A systematic review.* Case Studies in Construction Materials, 2021. **15**: p. e00698.

16. Tippayasam, C., et al., *Geopolymer Development by Powders of Metakaolin and Wastes in Thailand*, in *12th INTERNATIONAL CERAMICS CONGRESS PART H*. 2010. p. 63-68.

17. Castaldelli, V., et al., *Preliminary Studies on the use of Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) in the Manufacture of Alkali Activated Binders.* Key Engineering Materials, 2014. **600**: p. 689-698.

18. Rihan, M.A.M., et al., *Effect of sugarcane bagasse ash addition and curing temperature on the mechanical properties and microstructure of fly ash-based geopolymer concrete.* Open Ceramics, 2024. **19**: p. 100616.

19. Aziz, I., et al., *Development of Geopolymer Foam Concrete Incorporating Sugarcane Bagasse Ash and Fly Ash; 100% Recycled and Cement-Less Concrete.* Arabian Journal for Science and Engineering, 2022. **48**(4): p. 5655-5665.

20. Chuewangkam, N., et al., *Mechanical and Dielectric Properties of Fly Ash Geopolymer/Sugarcane Bagasse Ash Composites.* Polymers (Basel), 2022. **14**(6).

21. Rihan, M., et al., *Impact of Alkaline Concentration on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Made Up of Fly Ash and Sugarcane Bagasse Ash.* 2024. **16**: p. 2841.

22. Rihan, M., et al., *Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete Containing Fly Ash and Sugarcane Bagasse Ash.* Civil Engineering Journal, 2024. **10**: p. 1292-1309.

23. Le, D.-H., Y.-N. Sheen, and M. Lam, *Potential utilization of sugarcane bagasse ash for developing alkali-activated materials.* Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2021. **11**: p. 1-17.

24. Vanathi, V., V. Nagarajan, and P. Jagadesh, *Influence of sugarcane bagasse ash on mechanical properties of geopolymer concrete.* Journal of Building Engineering, 2023. **79**: p. 107836.

25. Thomas, B.S., et al., *Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review.* Materials Today Sustainability, 2021. **15**: p. 100086.

26. Bahurudeen, A. and M. Santhanam, *Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash.* Cement and Concrete Composites, 2015. **56**: p. 32-45.

27. Nguyen, T.-T., et al., *Research and Development Prospects for Sugarcane Industry in Vietnam.* Sugar Tech, 2022. **24**.

28. *'Bão bụi tro' từ Nhà máy đường Biên Hòa - Phan Rang.* https://tuoitre.vn/bao-bui-tro-tu-nha-may-duong-bien-hoa-phan-rang-20230315191959827.htm. 2023.

29. *ASTM C (2018) C33/C33M-18. ASIM International, West conshohocken.PA USA, Standard specification for concrete aggregates*. 2018.

30. *ASTM C109/C109 M. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), USA*. 2016.

31. Aliabdo, A.A., A.E.M. Abd Elmoaty, and H.A. Salem, *Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance.* Construction and Building Materials, 2016. **121**: p. 694-703.

32. Ekaputri, J., et al., *The effect of alkali concentration on chloride penetration in geopolymer concrete.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. **615**: p. 012114.

33. *BS EN 1015-10 . Methods of test for mortar for masonry. Determination of dry bulk density of hardened mortar. BSI*. 1999.

34. *BS EN 1015-18 . Methods of test for mortar for masonry. Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. BSI*. 2022

35. *ASTM C348 – 02. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. 2002.