

THỜI GIAN NINH KẾT, CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN VÀ CO NGÓT CỦA VẬT LIỆU KIỂM HOẠT HÓA XỈ LÒ CAO NGHIÊN MỊN-TRO BÃ MÍA

Lê Đức Hiền^{a,*}, Yeong-Nain Sheen^b

^aKhoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Tôn Đức Thắng,
19 đường Nguyễn Hữu Thọ, Quận 7, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng, Trường Đại học Quốc lập Khoa học Kỹ thuật Cao Hùng, Đài Loan

Nhận ngày 01/11/2021, Sửa xong 29/12/2021, Chấp nhận đăng 12/01/2022

Tóm tắt

Gần đây, ứng dụng vật liệu kiểm hoạt hóa xỉ lò cao để thay thế xi măng dành được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Tro bã mía –phát sinh trong quá trình đốt bã mía để sản xuất điện sinh khối, hiện chưa được sử dụng hiệu quả, gây ô nhiễm môi trường. Bài báo này trình bày nghiên cứu ứng dụng tro bã mía để phát triển vật liệu kiểm hoạt hóa xỉ lò cao. Theo đó, xỉ lò cao hạt mịn được trộn đều với tro bã mía (sau khi sàng qua rây số hiệu #100) theo các tỷ lệ khối lượng khác nhau (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40) để tạo ra vật liệu kiểm hoạt hóa. Dung dịch kiểm hoạt hóa được tổng hợp từ natri hydroxit và thủy tinh lỏng, có độ kiềm khác nhau (6%, 8%, 10%). Mẫu vật liệu kiểm hoạt hóa được dưỡng hộ trong không khí ở nhiệt độ phòng. Kết quả thí nghiệm cho thấy, sử dụng lượng tro và dung dịch hoạt hóa với độ kiềm hợp lý có thể điều chỉnh thời gian ninh kết của hỗn hợp. Hỗn hợp 90/10 có cường độ cao nhất và độ hút nước nhỏ nhất. Hỗn hợp 80/20 có độ co ngót nhỏ nhất, giảm 1,3–3 lần so với mẫu 100/0.

Từ khoá: tro bã mía; vật liệu kiểm hoạt hóa xỉ lò cao; thời gian ninh kết; cường độ chịu nén.

SETTING TIME, COMPRESSIVE STRENGTH AND DRYING SHRINKAGE OF AKALI-ACTIVATED GROUND BLAST FURNACE SLAG-SUGARCANE BAGASSE ASH PASTES

Abstract

In recent years, utilization of alkali-activated slag in place of Portland cement has been received a great attention of scholars, towards sustainable development. Sugarcane bagasse ash (SBA)—a by product of sugar industries, generated from combustion of bagasse in boilers for electricity production, has not been used effectively yet, causing environmental concerns. This paper presents a study on implementation of SBA to develop alkali-activated slag. Accordingly, SBA after passing through the No.100 sieve was uniformly mixed with ground blast furnace slag (GBFS) with different mass proportions (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40) to prepared alkali-activated pastes. Sodium hydroxide and sodium silicate solutions were used to make alkali-based activators with variations of alkalinity (6%, 8%, 10%). Alkali-activated paste specimens were cured under room-air ambient. The testing results show that, setting times of the composites could be effectively adjusted by logically varying SBA dosage and sodium concentration. Mixture 90/10 exhibited the highest compressive strength and the lowest water absorption. Meanwhile, the mixture 80/20 had the lowest magnitude of shrinkage, which decreased by 1.3–3 times, compared to those of the mixture 100/0.

Keywords: sugarcane bagasse ash; alkali-activated slag; setting time; compressive strength.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(1V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(1V)-11) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: leduchien@tdtu.edu.vn (Hiền, L. Đ.)

1. Giới thiệu

Quá trình sản xuất xi măng gây ô nhiễm nghiêm trọng môi trường sống do thải ra nhiều bụi và phát tán lượng lớn CO_2 vào không khí. Trong những năm gần đây, vật liệu kiềm hoạt hóa xỉ lò cao nghiền mịn (alkali-activated slag, AAS) – một loại chất kết dính thể hệ mới, được sử dụng thay thế cho xi măng trong lĩnh vực xây dựng, thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu vật liệu xây dựng, nhằm tạo ra vật liệu thân thiện với môi trường, hướng đến phát triển bền vững [1–3]. AAS được tạo bởi quá trình hoạt hóa vật liệu xỉ lò cao hoạt tính (ground granulated blast furnace slag) bởi dung dịch kiềm có nồng độ phù hợp. Xỉ lò cao, một loại vật liệu alumino-silicate có chứa thành phần silicon, alumina hoạt tính, là một loại sản phẩm phụ của quá trình luyện thép, được dùng rộng rãi trong ngành công nghiệp bê tông. Quá trình hoạt hóa xỉ lò cao với dung dịch kiềm có thể xảy ra ở điều kiện nhiệt độ thường, tạo ra calcium-aluminosilicate hydrate (C-A-S-H), thành phần chủ đạo hình thành cường độ và độ bền theo thời gian của vật liệu [4]. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng bê tông sử dụng vật liệu kiềm hoạt hóa vật liệu aluminosilicate có chất lượng tương đương, thậm chí vượt hơn so với bê tông xi măng truyền thống như: cường độ cao, khả năng chống ăn mòn hóa học, khả năng chống cháy cao, ... [2, 5]. Tuy nhiên, trở ngại lớn của bê tông AAS là đông cứng nhanh và co ngót mạnh [1, 6, 7]. Chúng loại và nồng độ dung dịch kiềm hoạt hóa có ảnh hưởng quan trọng đến tính chất của chất kết dính kiềm hoạt hóa xỉ lò cao [8]. Trong số nhiều loại dung dịch hoạt hóa có thể sử dụng như natri carbonate, natri sulfate, kali hydroxit; sự kết hợp hợp lý giữa natri hydroxit (NaOH) và thủy tinh lỏng (Na_2SiO_3), được thừa nhận mang lại hiệu quả cao [1, 4]. Độ kiềm (alkalinity, Na_2O) và mô-đun silicate ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) là hai thông số cơ bản của hỗn hợp dung dịch chứa NaOH và Na_2SiO_3 [8]. Về mặt lý thuyết, dung dịch có kiềm tính càng cao, sự hòa tan của khoáng aluminosilicate xảy ra càng nhanh, giải phóng nhiều silicate và aluminat.

Cây mía đường là một trong những cây trồng truyền thống và phổ biến ở Việt Nam và một số nước nhiệt đới khác. Trong quá trình ép lấy nước đường từ cây mía, một lượng lớn bã mía được tạo ra; và phần lớn bã mía được đốt trong các lò hơi của các nhà máy đường. Chất thải rắn trong quá trình này là tro bã mía (sugarcane bagasse ash). Theo Báo cáo ngành đường năm 2020 [9], mỗi năm nước ta có khoảng 15 triệu tấn mía nguyên liệu và có khoảng 40–45% (tương đương khoảng 6,0–6,7 triệu tấn) bã mía tươi được tạo ra và khoảng 80% trong số này dùng để sản xuất điện sinh khối. Ước tính có khoảng 50 ngàn tấn tro bã mía được thải ra từ các nhà máy đường trên cả nước, chất đồng ngoài tự nhiên và chưa có nhu cầu sử dụng phù hợp, gây ô nhiễm môi trường và chiếm nhiều diện tích đất chứa chất thải. Giống như nhiều loại tro khác (tro bay, tro trấu) [10], tro bã mía chứa các thành oxit quan trọng như silic, nhôm, canxi. Tuy vậy, thành phần hóa học, tính chất vật lý của tro bã mía có sự thay đổi lớn, tùy vào điều kiện thổ nhưỡng nơi trồng mía và nhiệt độ, điều kiện đốt [11]. Việc nghiên cứu ứng dụng tro bã mía ở vào sản xuất vật liệu xây dựng (gạch, xi măng, bê tông) đã được một số nhà khoa học thực hiện, mang lại những hiệu quả rõ ràng [11–13]. Tuy vậy, có rất ít tài liệu nghiên cứu về loại tro phế thải rắn này được ghi nhận ở Việt Nam.

Để mở rộng phạm vi ứng dụng của vật liệu AAS, nhiều tác giả đề xuất sử dụng kết hợp xỉ lò cao hoạt tính và tro bay, nhằm kéo dài thời gian ninh kết và giảm độ co ngót của hỗn hợp [6, 14]. Trong bài báo này, tro bã mía – thu thập từ nhà máy đường Sóc Trăng (Tỉnh Sóc Trăng) được phân tích thành phần hóa học, đặc tính vật lý trước khi sử dụng cùng với xỉ lò cao hạt mịn để tạo vật liệu kiềm hoạt hóa. Sự có mặt của thành phần tro bã mía trong hỗn hợp được chứng minh cải thiện thời gian ninh kết, độ bền cơ học, và độ bền lâu (giảm độ co ngót, độ hút nước) so với vật liệu kiềm hoạt hóa xỉ lò cao.

2. Vật liệu sử dụng và các đặc tính của tro bã mía

Hỗn hợp chất kết dính kiềm hoạt hóa được hình thành từ các vật liệu sau: xỉ lò cao nghiền mịn (GBFS), tro bã mía đã qua xử lý sàng, dung dịch kiềm hoạt hóa (gồm dung dịch NaOH và Na_2SiO_3) và nước sạch.

2.1. Tro bã mía (SBA), phân tích các đặc tính của vật liệu SBA

Tro bã mía thô được thu thập từ bãi tro phế thải của một nhà máy đường ở phía Nam. Mẫu tro sau khi được sấy khô ở 110°C trong 24 h được rây qua sàng số hiệu #100 ASTM (kích thước lỗ 149 μm) để loại bỏ tạp chất và thành phần tro thô chưa cháy hết. Phần tro mịn sau khi lọt qua rây #100 được chứa trong các túi ni lông cách ẩm để dùng cho thí nghiệm. Tro thu được có tỷ diện Blaine 4449 cm^2/g , tỷ trọng 2,165. Thành phần oxit của tro bã mía được phân tích bằng phổ nhiễu xạ huỳnh quang tia X (X-ray fluorescence). Kết quả phân tích ở Bảng 1 cho thấy vật liệu SBA có đầy đủ các thành phần quan trọng của vật liệu pozzolan như SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Thành phần SiO_2 chiếm tỷ lệ cao nhất (gần 75%), do đặc điểm tích lũy silic của cây mía đường; tổng hàm lượng ba oxit ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$) lớn hơn 70%, thỏa yêu cầu của ASTM C618 đối với vật liệu pozzolan. Kết quả phân tích thành phần hóa học đối với SBA khá tương đồng với nhiều nghiên cứu trước đây [11, 16], chỉ ra rằng vật liệu SBA có thể sử dụng hiệu quả trong sản xuất bê tông. Điểm cần lưu ý là lượng mất khi nung (LOI)

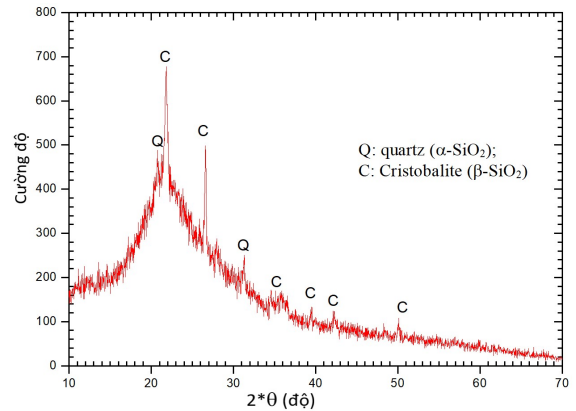
Bảng 1. Thành phần oxide và tính chất vật lý của SBA và GBFS

Đặc tính	Tro bã mía (SBA)	Xỉ lò cao nghiền mịn (GBFS)
1. Thành phần oxit (%)		
SiO_2	74,94	33,65
Al_2O_3	6,48	13,67
Fe_2O_3	2,14	1,18
CaO	1,417	42,11
MgO	1,132	6,53
TiO_2	0,398	-
P_2O_5	0,775	-
SrO	0,0162	-
SiO_3	-	1,87
BaO	0,0361	-
MnO_2	0,0575	-
Na_2O	0,785	0,57
K_2O	2,752	0,57
Mất khi nung, LOI (%)	9,07	0,58
2. Các tính chất vật lý (TCVN4030:2003 [15])		
+ Tỷ diện Blaine (cm^2/g)	4449	4000
+ Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,165	2,89
+ Kích thước hạt (μm):		
d_{10}	2,56	5,61
d_{50}	20,42	22,14
d_{90}	82,95	113,73

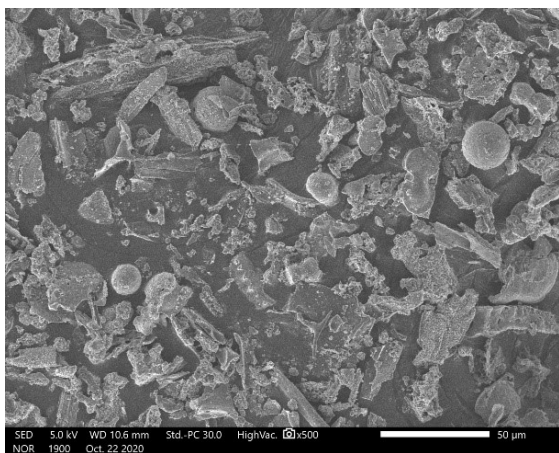
tương đối cao (9,07%), được giải thích do SBA chứa nhiều carbon chưa cháy hết [17]; vì thế mẫu tro có màu đen như quan sát ở Hình 1(a). Trong một nghiên cứu khác [16] đối với vật liệu SBA thu thập từ nhà máy đường ở Thanh Hóa, lượng mất khi nung được xác định 8,91%.



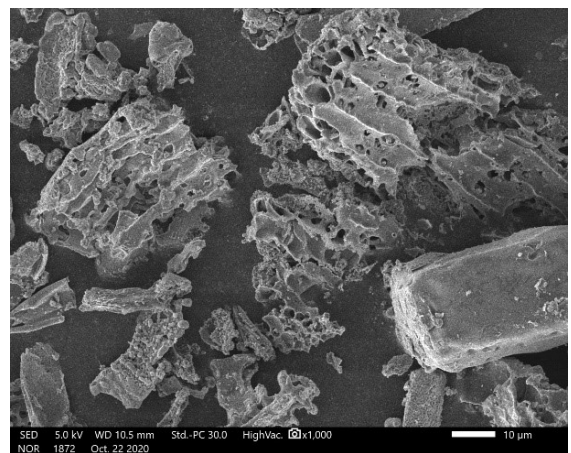
(a) Ảnh mẫu vật liệu SBA



(b) Kết quả chụp phổ XRD



(c) Ảnh SEM, độ phóng đại $\times 500$



(d) Ảnh SEM, độ phóng đại $\times 1000$

Hình 1. Hình ảnh SEM và phổ nhiễu xạ tia X của tro bã mía dùng trong thí nghiệm

Trên Hình 1(b), hình ảnh phổ nhiễu xạ tia X (X-ray diffraction, XRD) cho thấy pha tồn tại chính của SiO_2 dạng quartz ($\alpha\text{-SiO}_2$) và Cristobalite ($\beta\text{-SiO}_2$), đỉnh phổ phát hiện nằm ở góc 2θ trong khoảng 20–30 °C; vật liệu SBA có cấu trúc vô định hình, hoạt tính cao, nên dễ xảy ra phản ứng hóa học; phù hợp với ứng dụng của một vật liệu pozzolan. Hình 1(c, d) thể hiện ảnh trạng thái bề mặt mẫu tro bã mía qua kính hiển vi điện tử quét (SEM, Scanning Electric Microscope). Dễ thấy rằng, tro bã mía có kích thước cỡ μm , hình dạng không đồng nhất, có nhiều góc cạnh; cấu trúc xốp, bề mặt có nhiều lỗ rỗng. Vì thế, hạt tro bã mía có đặc tính hấp thụ nhiều nước; do đó, hỗn hợp vữa bê tông có chứa vật liệu SBA thường có độ sụt giảm (giảm tính công tác) [12, 18].

2.2. Xử lý cao nghiền mịn

Xử lý cao nghiền mịn (GBFS) dùng trong thí nghiệm này thuộc loại S95 (TCVN 11586:2016), dạng thương phẩm của Tập đoàn Hòa Phát. Vật liệu xỉ GBFS có độ mịn Blaine cỡ $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ và có

khối lượng riêng 2,89 g/cm³. Thành phần oxit của xỉ lò cao được trình bày ở Bảng 1, với thành phần chủ yếu là CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO.

2.3. Dung dịch kiềm hoạt hóa

Dung dịch kiềm hoạt hóa trong thí nghiệm này được tổng hợp từ dung dịch Natri hidroxit (NaOH)-10M và thủy tinh lỏng (Natri silicate, Na₂SiO₃), được cung cấp bởi công ty Merck Vietnam. Trong đó, dung dịch NaOH, nồng độ 10M được pha chế từ NaOH dạng viên nhỏ thể rắn, độ tinh khiết 98%; dung dịch thủy tinh lỏng có tỷ lệ thành phần 9% Na₂O, 28% SiO₂, 63% H₂O, khối lượng riêng 2,61 g/cm³, trọng lượng riêng 1,38 g/cm³.

2.4. Thiết kế thành phần hỗn hợp vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA

Trong nghiên cứu này, hỗn hợp kiềm hoạt hóa có khối lượng thể tích tương đương bê tông xi măng thông thường (2100–2250 kg/m³). Tỷ lệ khối lượng nước/thành phần chất rắn (*L/S*) của hỗn hợp được chọn trước 0,35, sau một vài bước trộn thử và tham khảo từ nghiên cứu trước [19]. Cần lưu ý rằng, lượng nước bao gồm nước trộn và nước có trong dung dịch kiềm. Tỷ lệ phần trăm khối lượng giữa GBFS/SBA thay đổi lần lượt theo các mức 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 (tổng khối lượng GBFS+SBA không thay đổi). Dung dịch kiềm hoạt hóa được tạo thành từ dung dịch NaOH-10M (pha chế từ NaOH dạng viên rắn) và dung dịch thủy tinh lỏng (Na₂SiO₃), đặc trưng bởi hai tham số: (i) nồng độ kiềm (*m*, % = $\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{SBA} + \text{GBFS}} \times 100$) và (ii) mô-đun silicate (*n* = $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}$). Lưu ý rằng, phân tử SiO₂ chỉ có trong dung dịch Na₂SiO₃ và Na₂O có trong cả dung dịch NaOH và dung dịch Na₂SiO₃. Trong thí nghiệm này, nhằm khảo sát ảnh hưởng của nồng độ kiềm (*m*) đến tính chất của vật liệu kiềm hoạt hóa, ba dung dịch kiềm hoạt hóa được tạo ra, tương ứng với ba nồng độ kiềm (6%, 8%, 10%); cả 3 dung dịch kiềm hoạt hóa có mô-đun silicate được chọn không đổi (*n* = 0,6). Mỗi tỷ lệ trộn của GBFS/SBA được lần lượt trộn đều ba dung dịch kiềm hoạt hóa nêu trên. Các thành phần vật liệu của mỗi hỗn hợp được trộn đều với máy trộn vừa có dung tích 225 lít. Tóm lại, có tổng cộng 15 cấp phối hỗn hợp (5 tỷ lệ GBFS/SBA×3 cấp nồng độ Na₂O) được tạo ra khi thay đổi tỷ lệ GBFS/SBA và nồng độ kiềm của dung dịch hoạt hóa.

2.5. Thí nghiệm vật liệu kiềm hoạt hóa và chuẩn bị mẫu thử

Bảng 2. Các thí nghiệm, mẫu thử đối với vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA

Chỉ tiêu thí nghiệm	Tiêu chuẩn áp dụng	Kích thước/số lượng mẫu	Độ tuổi mẫu (ngày)
1. Tính công tác (đo độ sụt, đường kính xòe* – sử dụng côn thử độ sụt hình nón cắt loại thu nhỏ 50 × 100 × 150 mm).	-	-	-
2. Thời gian ninh kết, (dùng kim Vicat)	ASTM C191 [20]	-	-
3. Cường độ chịu nén	ASTM C109 [21]	50 × 50 × 50 mm (3 × 3 × 15 = 135)	3, 7, 28
4. Khối lượng thể tích	ASTM C642 [22]	50 × 50 × 50 mm	28
5. Độ hút nước		(3 × 15 = 45)	
6. Co ngót (thay đổi chiều dài mẫu)	ASTM C490 [23]	25 × 25 × 285 mm (3 × 15 = 45)	3, 7, 14, 28

Ghi chú: (*) Đo bằng giá trị trung bình đường kính lớn nhất theo hai phương vuông góc của khối vật liệu sau khi rút côn theo phương thẳng đứng.

Bảng 2 trình bày các thí nghiệm thực hiện cho vật liệu kiểm hoạt hóa theo tiêu chuẩn ASTM, bao gồm: tính công tác (đánh giá qua độ sụt, đường kính xòe) và thời gian ninh kết (bắt đầu và kết thúc) của vữa được đánh giá. Mẫu lập phương cạnh 50 mm và thanh vữa có kích thước $25 \times 25 \times 285$ mm được đúc và dưỡng hộ trong không khí (nhiệt độ phòng thí nghiệm) cho đến thời điểm thí nghiệm (xem Hình 2). Các kết quả đo được tiến hành tối thiểu trên 03 mẫu, và giá trị trung bình của các lần đo được ghi nhận.



(a) Mẫu vữa lập phương cạnh 50 mm



(b) Đo thay đổi chiều dài thanh mẫu vữa

Hình 2. Hình ảnh mẫu vật liệu kiểm hoạt hóa GBFS/SBA dùng cho thí nghiệm

3. Kết quả thí nghiệm và các phân tích

3.1. Kết quả thí nghiệm tính công tác của hỗn hợp kiểm hoạt hóa

Tính công tác (còn gọi là tính linh động) của hỗn hợp được đo bằng độ sụt và đường kính xòe trên mặt phẳng của khối vật liệu kiểm hoạt hóa sau khi rút dụng cụ côn hình nón theo phương thẳng đứng. Giá trị độ sụt và đường kính xòe của các hỗn hợp khác nhau được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả đo độ sụt [đường kính xòe] (cm), của vật liệu kiểm hoạt hóa GBFS/SBA

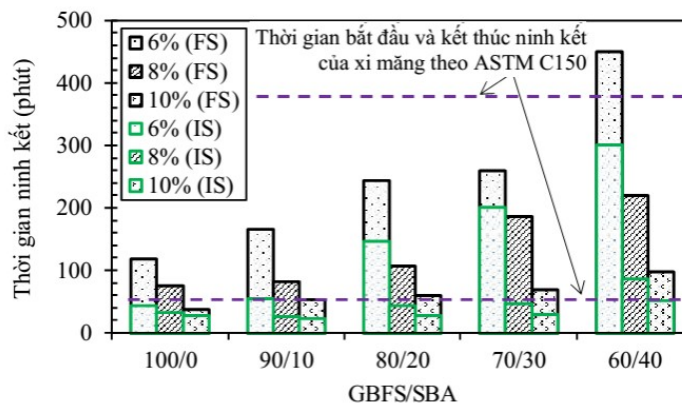
$m, \%$	n	Độ sụt [đường kính xòe] (cm), của hỗn hợp kiểm hoạt hóa với tỷ lệ thành phần GBFS/SBA khác nhau:				
		100/0	90/10	80/20	70/30	60/40
6	0,6	11,5 [33,4]	11,3 [32,1]	11,1 [31,8]	11,1 [28,7]	10,9 [27,6]
8		11,4 [30,1]	11,2 [28,7]	10,9 [27,9]	10,5 [26,0]	10,4 [24,6]
10		11,2 [28,4]	11,1 [27,3]	10,8 [23,6]	10,3 [20,0]	9,6 [14,6]

Các hỗn hợp có độ sụt cao, nằm trong khoảng 9,6–12 cm. Quan sát bằng mắt thường cho thấy các hỗn hợp chất kết dính kiểm hoạt hóa có khả năng tự chảy và độ đồng nhất cao; không nhìn thấy hiện tượng tách nước ở mép rìa của khối vật liệu sau khi nâng côn thử độ sụt. Ngoài ra, kết quả thí

nghiệm cho thấy độ sụt giảm dần khi tăng lượng SBA trong hỗn hợp. Điều này có thể lý giải do đặc tính háo nước vốn có của tro bã mía (do có cấu trúc hạt rỗng, xốp) và thành phần carbon chưa cháy (minh chứng lượng mất khi nung lớn, 9,07%). Lượng nước trộn yêu cầu tăng đối với hỗn hợp chứa lượng SBA tăng, đã được khẳng định bởi các nghiên cứu trước [17, 24]. Thêm vào đó, tính công tác của hỗn hợp giảm dần khi nồng độ kiềm tăng lên. Hiện tượng này liên quan đến sự hình thành nhanh sản phẩm phản ứng hydrate hóa, nhất là khi dung dịch có độ kiềm cao [1].

3.2. Thời gian ninh kết của vật liệu kiềm hoạt hóa

Hình 3 thể hiện kết quả xác định thời gian ninh kết của tất cả các hỗn hợp kiềm hoạt hóa, thay đổi trong khoảng 28–300 phút (thời gian bắt đầu ninh kết) và 38–450 phút (thời gian kết thúc ninh kết). Đối với xi măng Poóclăng, thời gian bắt đầu và kết thúc ninh kết lần lượt là 45 phút và 375 phút [25]. Kết quả thí nghiệm cho thấy, hỗn hợp 100/0 có hiện tượng đông cứng rất nhanh, có thời gian bắt đầu ninh kết dưới 45 phút. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đây đối chất kết dính kiềm hoạt hóa từ xỉ lò cao [1, 6, 14], do quá trình phản ứng (hòa tan) GBFS xảy ra nhanh hơn trong môi trường kiềm giải phóng nhanh ion Ca^{2+} . Liên kết cộng hóa trị $\text{Ca}-\text{O}$ dễ phá vỡ hơn so với liên kết $\text{Si}-\text{O}$ và $\text{Al}-\text{O}$ [26]. Đó cũng chính là lý do rút ngắn thời gian ninh kết đáng kể của vật liệu kiềm hoạt hóa khi nồng độ kiềm tăng lên (xem Hình 3). Tính chất ninh kết nhanh của vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS làm hạn chế phạm vi ứng dụng của loại vật liệu này trong thực tế, cần thời gian đủ dài để vận chuyển và thi công [5].

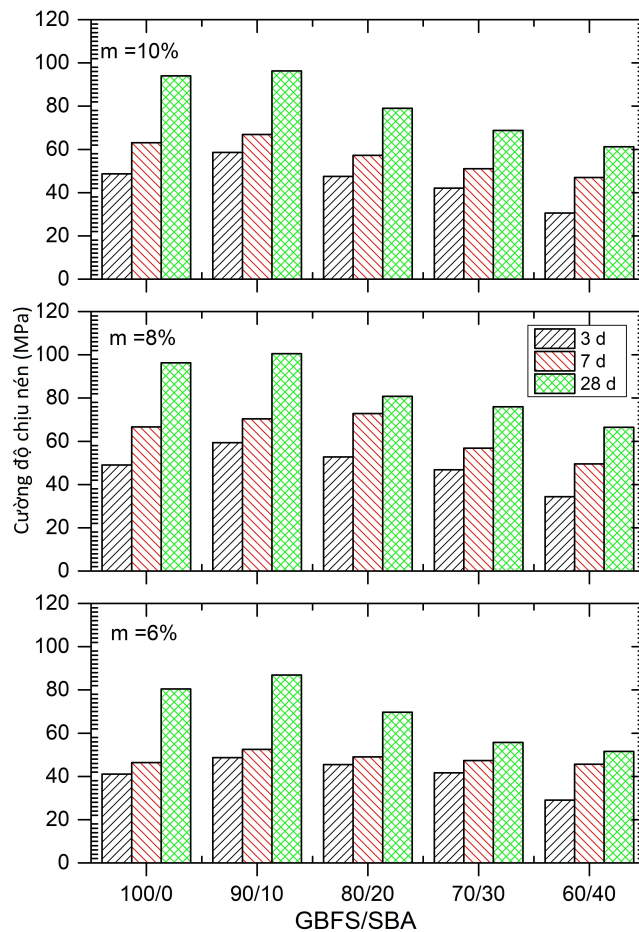


Hình 3. Thời gian ninh kết của các hỗn hợp vật liệu kiềm hoạt hóa (IS và FS lần lượt là thời gian bắt đầu và kết thúc ninh kết)

Từ kết quả trên Hình 3, thay thế một phần xỉ lò cao bằng tro bã mía có thể điều chỉnh kéo dài thời gian ninh kết của chất kết dính kiềm hoạt hóa. Thật vậy, các hỗn hợp chứa 10% SBA trở lên và 6% Na_2O đều có thời gian ninh kết dài hơn 45 phút. Tuy thế, khi khối lượng SBA tăng đến 40%, chất kết dính kiềm hoạt hóa có thời gian ninh kết thúc kéo dài hơn 375 phút (giới hạn cho phép của xi măng Poóclăng). Khi đó, bằng cách tăng nồng độ Na_2O từ 6% lên 8% và 10% sẽ rút ngắn đáng kể thời gian ninh kết. Thành phần CaO thấp trong SBA (1,41%) so với trong GBFS (42,11%), làm chậm phản ứng geopolymer hóa có thể gây ra kéo dài quá trình đông cứng [27]. Từ những kết quả trên, có thể nhận xét rằng sử dụng tỷ lệ phù hợp SBA với nồng độ dung dịch hoạt hóa có thể giải quyết khó khăn liên quan đến hiện tượng đông cứng nhanh của hỗn hợp kiềm hoạt hóa xỉ lò cao.

3.3. Cường độ chịu nén của vật liệu kiềm hoạt hóa

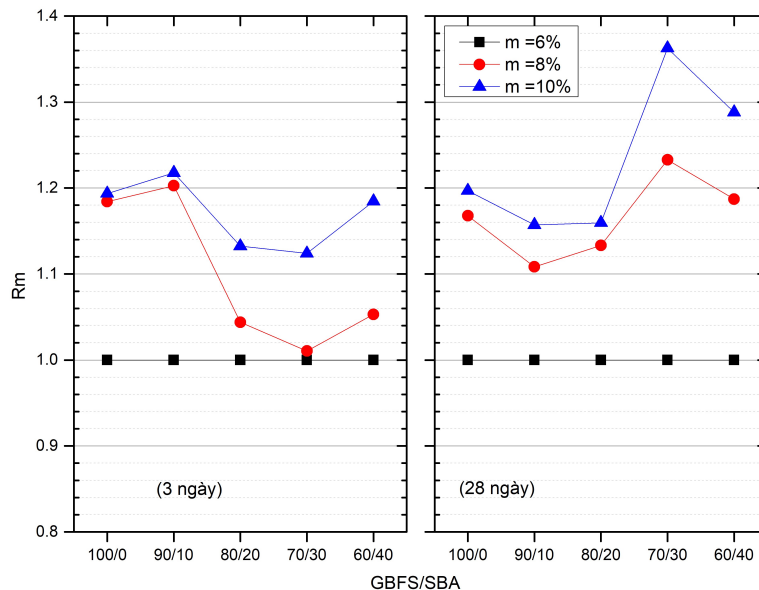
Sự phát triển cường độ chịu nén mẫu lập phương cạnh 50 mm của vật liệu kiềm hoạt hóa hỗn hợp GBFS/SBA được trình bày ở Hình 4. Độ lệch chuẩn của kết quả thí nghiệm xác định cường độ chịu nén nằm trong phạm vi $\pm 5\%$. Mẫu 100/0, với nồng độ kiềm 6%, 8%, 10% đạt cường độ 41,11 MPa, 48,68 MPa, 49,07 MPa sau 3 ngày và tăng lên 80,46 MPa (tăng 96%), 93,96 MPa (tăng 93%), 96,3 MPa (tăng 96%) sau 28 ngày. Tức là, sau 3 ngày mẫu mẫu đạt được xấp xỉ 50% giá trị cường độ sau 28 ngày. Cường độ vật liệu phát triển theo thời gian do quá trình geopolymer hóa của GBFS, tạo ra sản phẩm hydrat hóa (C, N)–A–S–H, là yếu tố chính hình thành cường độ của chất kết dính [28]. Cường độ phát triển sớm (sau 3 ngày) là điểm chú ý, phù hợp với ứng dụng của bê tông cường độ cao. Trong khi đó, mẫu 90/10 đạt cường độ sau 3 ngày là 48,73 MPa, 56,61 MPa, 59,34 MPa, tăng lên 86,89 MPa, 96,3 MPa, 100,55 MPa sau 28 ngày, tương ứng với nồng độ kiềm lần lượt 6%, 8%, 10%. Mẫu 90/10 có cường độ tăng nhẹ so với mẫu 100/0 (khoảng 6% sau 28 ngày). Kết quả này cho thấy sự có mặt của SBA (với một tỷ lệ hạn chế) làm tăng nhanh quá trình geopolymer hóa trong thời gian đầu (đến 28 ngày). Một nghiên cứu bởi Pereira và cs. [13] chỉ ra rằng, vữa GBFS/SBA hoạt hóa bằng dung dịch kiềm ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) có độ rỗng giảm nhẹ so với vữa hoạt hóa GBFS (không có SBA). Tuy nhiên, khi lượng SBA tăng hơn 20%, cường độ vữa giảm đáng kể so với mẫu



Hình 4. Sự phát triển cường độ chịu nén của các cấp phối vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA

tương ứng 100/0. Kết quả này có thể giải thích do quá trình polymer hóa SBA tạo ra nhiều cấu trúc rỗng hơn so với GBFS, do chứa nhiều hạt SBA chưa tham gia phản ứng [28, 29]. Từ những kết quả nêu trên, trong phạm vi thời gian thí nghiệm (đến 28 ngày), có thể nhận xét rằng tỷ lệ hỗn hợp 90/10 (90% GBFS+10% SBA) nâng cao cường độ của vật liệu kiềm hoạt hóa. Sự phát triển cường độ của chất kết dính kiềm hoạt hóa GBFS/SBA trong dài hạn (sau 28 ngày) cần được nghiên cứu thêm.

Ảnh hưởng của nồng độ kiềm đến cường độ vật liệu hoạt hóa GBFS/SBA được thể hiện ở Hình 5. Hình này thể hiện tỷ số cường độ (R_m) giữa mẫu có nồng độ kiềm 8% và 10% so với mẫu có nồng độ kiềm 6%. Có thể thấy rằng, với cùng tỷ lệ GBFS/SBA, gia tăng nồng độ kiềm làm tăng cường độ mẫu ở các thời điểm 3 ngày và 28 ngày. Kết quả này phù hợp với công bố trước đó [30], do SiO_2 có trong SBA bị hòa tan trong dung dịch có hàm lượng Na_2O cao, tạo ra nhiều ion Si^{4+} and Al^{3+} trong quá trình geopolymer hóa. Ngoài ra, với hỗn hợp chứa nhiều thành phần SBA (30% và 40%), ảnh hưởng của nồng độ dung dịch kiềm đến cường độ chịu nén ở 28 ngày trở nên rõ ràng hơn. Tỷ số cường độ mẫu 70/30 khi nồng độ kiềm 8%, 10% so với khi nồng độ 6% có giá trị thấp nhất ở 3 ngày tuổi và cao nhất ở 28 ngày tuổi. Sự hòa tan chậm trong môi trường kiềm của SBA (so với GBFS) ở nhiệt độ thường có thể là nguyên nhân của kết quả trên. Trong một nghiên cứu trước, Pereira và cs. [13] đã chỉ ra rằng, phản ứng của SBA trong dung dịch kiềm hoạt hóa (hình thành cường độ) xảy ra trong dài hạn.



Hình 5. Cường độ tương đối (R_m) của mẫu có nồng độ $m = 8\%$, 10% so với mẫu có $m = 6\%$

3.4. Khối lượng thể tích khô của vật liệu kiềm hoạt hóa

Khối lượng thể tích khô sau 28 ngày tuổi của mẫu hỗn hợp kiềm hoạt hóa GBFS/SBA được liệt kê ở Bảng 4. Với các nồng độ Na_2O khác nhau ($m = 6\%$, 8% , 10%), mẫu 90/10 đều có giá trị khối lượng thể tích khô lớn nhất, tiếp theo là mẫu 100/0. Khi thay thế 10% GBFS bởi SBA dẫn đến khối lượng thể tích khô của mẫu tăng 2,7%, 4,3%, 4,2%, tương ứng với nồng độ natri oxit lần lượt 6%, 8%, 10%. Điều này chứng tỏ mẫu 90/10 có cấu trúc đặc chắc hơn mẫu 100/0. Kết quả là, khối lượng thể tích mẫu tăng lên, phù hợp với sự thay đổi độ bền chịu nén của vật liệu. Giá trị cường độ chịu nén từ thí nghiệm cho thấy mẫu 90/10 có cường độ cao nhất, tiếp theo mẫu 100/0. Khi tiếp tục tăng tỷ lệ SBA (từ 20% trở lên) khối lượng thể tích mẫu giảm. Chẳng hạn, mẫu 60/40 có khối lượng thể tích giảm đến 4–5%

so với mẫu 100/0. Lý do được giải thích là khối lượng riêng của SBA (2,165) nhỏ hơn so với GBFS (2,89). Khi thay thế bằng một khối lượng thì thể tích của tro sẽ nhiều hơn, do đó khối lượng thể tích mẫu giảm đi. Một nghiên cứu của Castaldelli và cs. [28] đã chỉ ra rằng cấu trúc vữa của hỗn hợp chứa 15% SBA trở lên sẽ có thể tích lỗ rỗng (có kích thước 10–10⁴ nm) tăng lên. Hơn nữa, sự khác biệt về sản phẩm phản ứng với kiềm giữa GBFS, tạo ra C-A-S-H gel với cấu trúc đặc chắc và với SBA, tạo ra N-A-S-H gel có cấu trúc nhiều lỗ rỗng hơn cũng có thể liên quan cho kết quả trên [13, 27].

Bảng 4. Khối lượng thể tích khô và độ hút nước của vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA

<i>m</i> , %	<i>n</i>	Khối lượng thể tích (g/cm ³) và [độ hút nước (%)], của vật liệu kiềm hoạt hóa với tỷ lệ thành phần GBFS/SBA khác nhau:				
		100/0	90/10	80/20	70/30	60/40
6	0,6	1,83 [14,6]	1,88 [12,9]	1,85 [17,8]	1,83 [19,2]	1,76 [20,6]
8		1,85 [11,5]	1,93 [9,2]	1,83 [16,0]	1,84 [16,8]	1,78 [19,2]
10		1,89 [10,3]	1,97 [9,5]	1,86 [11,8]	1,85 [14,7]	1,8 [17,0]

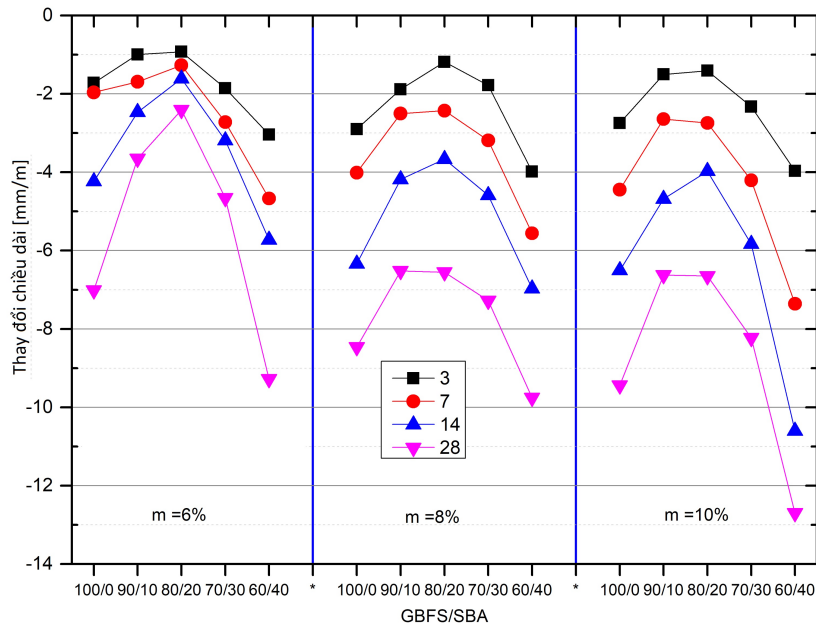
3.5. Độ hút nước của vật liệu kiềm hoạt hóa

Độ hút nước của vật liệu phản ánh thể tích rỗng bên trong của cấu trúc, từ đó ảnh hưởng đến các tính chất cơ học và độ bền của vật liệu [31]. Độ hút nước của mẫu vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA sau 28 ngày tuổi được trình bày trong Bảng 4. Nhận xét rằng mẫu 90/10 có độ hút nước thấp nhất, đạt giá trị 12,9%, 9,2%, và 9,5% tương ứng với nồng độ natri oxit 6%, 8%, và 10%. Kết quả này phù hợp với sự biến thiên khối lượng thể tích khô và cường độ chịu nén mẫu, như đã trình bày ở phần trên. Ngoài ra, tăng nồng độ kiềm hoạt hóa cũng sẽ làm cho cấu trúc bên trong mẫu trở nên đặc chắc hơn do các lỗ rỗng bị lấp đầy bởi sản phẩm của phản ứng geopolimer và thành phần hạt mịn SBA. Kết quả là, độ hút nước sẽ giảm đối với mẫu có nồng độ kiềm lớn hơn (Bảng 4).

3.6. Độ co ngót của vật liệu kiềm hoạt hóa

So với xi măng Portland thông thường, vật liệu chất kết dính kiềm hoạt hóa từ xỉ lò cao có độ co ngót lớn hơn nhiều (có thể lớn hơn vài lần), do cấu trúc bên trong có nhiều lỗ rỗng, nhiều vết nứt li ti (micro cracking) [7]. Đó là một trong những nhược điểm lớn của vật liệu xỉ kiềm hoạt hóa làm giảm độ bền vững theo thời gian khi tiếp xúc với môi trường [1]. Trong nghiên cứu này, sự thay đổi chiều dài (co ngót) của các thanh mẫu vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA khô cứng trong không khí, ở các độ tuổi khác nhau (3, 7, 14, 28 ngày) được thể hiện trên Hình 6. Về mặt vật lý, độ thay đổi chiều dài các mẫu tăng theo thời gian, liên quan đến lượng nước bốc hơi. Ở các độ tuổi thí nghiệm, mức độ co ngót của mẫu vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA đều lớn hơn vữa xi măng Poóc lăng thông thường (khoảng 0,2%). Mẫu 80/20 cho độ lớn thay đổi chiều dài mẫu (co ngót) nhỏ nhất trong số các mẫu thí nghiệm. Kết quả đo trên mẫu sau 28 ngày tuổi cho thấy, so với mẫu 100/0, mẫu 80/20 có sự thay đổi chiều dài giảm từ 1,3 đến 3 lần, tùy thuộc vào nồng độ dung dịch kiềm hoạt hóa. Từ kết quả này, có thể nhận định rằng, sử dụng thành phần SBA hợp lý sẽ làm giảm đáng kể mức độ co ngót của vật liệu kiềm hoạt hóa, nâng cao tính chất cơ học và độ bền lâu của kết cấu. Nghiên cứu tính co ngót đối với hỗn hợp kiềm hoạt hóa xỉ lò cao–tro bay cũng thu được kết quả tương tự [32]. Nguyên nhân giảm co ngót khi thêm vào thành phần tro (tro bã mía hoặc tro bay) được giải thích là do sản phẩm của phản ứng kiềm hoạt hóa tro có cấu trúc không gian bền vững hơn. Tuy nhiên, khi lượng SBA trong hỗn hợp

tiếp tục tăng lên (ví dụ, 30–40%), độ co ngót tăng nhanh. Đặc tính háo nước (hút nước nhiều) cùng với độ mịn lớn của vật liệu SBA so với GBFS tạo ra cấu trúc có độ rỗng tăng nhanh trong quá trình khô cứng do nước bốc hơi có thể là nguyên nhân gây tăng co ngót [6]. Một kết quả khác cũng đáng lưu ý, khi nồng độ kiềm tăng lên, cường độ mẫu tăng lên nhưng cũng sẽ làm tăng độ co ngót. Kết quả tương tự có thể tìm thấy trong một nghiên cứu của Thomas và cs. [3]. Thông thường, khi vật liệu có cường độ tăng kéo theo giảm độ co ngót; do đó, biến dạng co ngót được kỳ vọng giảm với mẫu nồng độ kiềm cao hơn. Tuy vậy, kết quả trên Hình 6 thể hiện xu hướng ngược lại. Điều này chứng tỏ rằng sự thay đổi cấu trúc lỗ rỗng (bao gồm độ rỗng và phân bố kích thước lỗ rỗng) là nguyên nhân của sự khác biệt trên. Khi nồng độ kiềm hoạt hóa tăng lên làm tổng độ rỗng giảm, đồng thời tăng thể tích lỗ rỗng mao quản (mesopores, kích thước 10 nm–10⁴ nm), vốn được cho ảnh hưởng quan trọng đến co ngót [33].



Hình 6. Kết quả đo thay đổi chiều dài của thanh vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA

4. Kết luận

Từ kết quả thí nghiệm và những phân tích ở trên, một số kết luận được rút ra như sau:

- Mẫu tro bã mía thu thập sau khi sàng qua rây #100 (149 μm) có độ mịn cao (4449 cm^2/g), chứa nhiều thành phần SiO_2 (~75%), Al_2O_3 (~6,5%), Fe_2O_3 (2,14%), CaO (1,42%), và một lượng nhỏ các oxit khác; nghiên cứu cho thấy mẫu SBA có hình dạng nhiều góc cạnh, bề mặt xốp, nhiều lỗ rỗng; vật liệu SBA tồn tại ở dạng cấu trúc tinh thể vô định hình.
- Vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA có độ sụt giảm dần khi tăng thành phần SBA trong hỗn hợp, do vật liệu SBA có độ hút nước cao. Ngoài ra, sử dụng hợp lý lượng SBA và dung dịch hoạt hóa có độ kiềm phù hợp để điều chỉnh thời gian ninh kết của hỗn hợp kiềm hoạt hóa, mở rộng phạm vi ứng dụng của loại vật liệu này.
- Vật liệu kiềm hoạt hóa GBFS/SBA trong thí nghiệm có cường độ rất cao (~100 MPa sau 28 ngày) và phát triển nhanh (sau 3 ngày đạt gần 50% giá trị cường độ sau 28 ngày). Hỗn hợp vật liệu

kiềm hoạt hóa GBFS/SBA chứa 90% GBFS và 10% SBA (90/10) có cường độ và khối lượng thể tích lớn nhất (cao hơn 6% so với mẫu 100/0) và có độ hút nước thấp nhất trong số các hỗn hợp thí nghiệm. Tăng độ kiềm của dung dịch hoạt hóa làm tăng độ bền cơ học của vật liệu kiềm hoạt hóa, nhất là đối với hỗn hợp có lượng SBA lớn (30–40%) ở 28 ngày.

- Sử dụng thành phần SBA hợp lý sẽ làm giảm đáng kể mức độ co ngót của vật liệu kiềm hoạt hóa, nâng cao tính chất cơ học và độ bền lâu. Mẫu vật liệu 80/20 có độ co ngót đo được nhỏ nhất, giảm 1,3–3 lần so với mẫu 100/0 sau 28 ngày.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2020.01.

Tài liệu tham khảo

- [1] Awoyera, P., Adesina, A. (2019). [A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder](#). *Case Studies in Construction Materials*, 11:e00268.
- [2] Bondar, D., Ma, Q., Soutsos, M., Basheer, M., Provis, J. L., Nanukuttan, S. (2018). [Alkali activated slag concretes designed for a desired slump, strength and chloride diffusivity](#). *Construction and Building Materials*, 190:191–199.
- [3] Thomas, R. J., Lezama, D., Peethamparan, S. (2017). [On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing](#). *Cement and Concrete Research*, 91:13–23.
- [4] Rashad, A. M. (2014). [A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash](#). *Materials & Design*, 53:1005–1025.
- [5] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. (2018). [One-part alkali-activated materials: A review](#). *Cement and Concrete Research*, 103:21–34.
- [6] Wang, G., Ma, Y. (2018). [Drying shrinkage of alkali-activated fly ash/slag blended system](#). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(4):203–213.
- [7] Hu, X., Shi, C., Zhang, Z., Hu, Z. (2019). [Autogenous and drying shrinkage of alkali-activated slag mortars](#). *Journal of the American Ceramic Society*, 102(8):4963–4975.
- [8] Aydın, S., Baradan, B. (2014). [Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars](#). *Composites Part B: Engineering*, 57:166–172.
- [9] FPT Securities (2020). *Sugar Industry Updated Reports (Báo cáo ngành đường)*.
- [10] Trung, T., Đại, B., Đầu, V. (2015). Nghiên cứu chế tạo vữa nền cho bê tông tự lên, cường độ cao sử dụng cát mịn và hỗn hợp phụ gia khoáng xỉ lò cao-tro trấu. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 9(9).
- [11] Khalil, M. J., Aslam, M., Ahmad, S. (2021). [Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review](#). *Construction and Building Materials*, 270:121371.
- [12] Bayapureddy, Y., Muniraj, K., Mutukuru, M. R. G. (2020). [Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in cement composites: strength, durability, and microstructural analysis](#). *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57(5):513–519.
- [13] Pereira, A., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzó, J., Payá, J. (2015). [Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag](#). *Ceramics International*, 41(10):13012–13024.
- [14] Lee, N. K., Lee, H. K. (2013). [Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature](#). *Construction and Building Materials*, 47:1201–1209.
- [15] TCVN 4030:2003. *Xi măng - Phương pháp xác định độ mịn*.
- [16] Phương, N. T. T., Hải, T. Q., Hoàn, N. V., Thoa, N. T., Hà, Đ. T., Hà, N. M. (2018). [Đặc tính của tro bã mía và sử dụng tro bã mía trong sản xuất gạch ceramic](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ*, 45.

- [17] Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. (2009). [Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars](#). *Construction and Building Materials*, 23(12): 3523–3531.
- [18] Zareei, S. A., Ameri, F., Bahrami, N. (2018). [Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash](#). *Construction and Building Materials*, 184:258–268.
- [19] Wang, W.-C., Wang, H.-Y., Tsai, H.-C. (2016). [Study on engineering properties of alkali-activated ladle furnace slag geopolymer](#). *Construction and Building Materials*, 123:800–805.
- [20] ASTM C191 (2004). *Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*.
- [21] ASTM C109 (2008). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*.
- [22] ASTM C642 (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- [23] ASTM C490 (2011). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*.
- [24] Jagadesh, P., Murthy, A. R., Murugesan, R. (2020). [Effect of processed sugar cane bagasse ash on mechanical and fracture properties of blended mortar](#). *Construction and Building Materials*, 262:120846.
- [25] ASTM C150 (2002). *Standard Specification for Portland Cement*.
- [26] Puligilla, S., Mondal, P. (2013). [Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer](#). *Cement and Concrete Research*, 43:70–80.
- [27] Li, N., Shi, C., Wang, Q., Zhang, Z., Ou, Z. (2017). [Composition design and performance of alkali-activated cements](#). *Materials and Structures*, 50(3).
- [28] Castaldelli, V., Akasaki, J., Melges, J., Tashima, M., Soriano, L., Borrachero, M., Monzó, J., Payá, J. (2013). [Use of Slag/Sugar Cane Bagasse Ash \(SCBA\) Blends in the Production of Alkali-Activated Materials](#). *Materials*, 6(8):3108–3127.
- [29] Moraes, J. C. B., Tashima, M. M., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J. (2017). [Effect of sugar cane straw ash \(SCSA\) as solid precursor and the alkaline activator composition on alkali-activated binders based on blast furnace slag \(BFS\)](#). *Construction and Building Materials*, 144:214–224.
- [30] Murugesan, T., Vidjeapriya, R., Bahurudeen, A. (2020). [Development of Sustainable Alkali Activated Binder for Construction Using Sugarcane Bagasse Ash and Marble Waste](#). *Sugar Tech*, 22(5):885–895.
- [31] de Medeiros-Junior, R. A., da Silva Munhoz, G., de Medeiros, M. H. F. (2019). [Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan](#). *Revista ALCONPAT*, 9(2):152–166.
- [32] Aydın, S. (2013). [A ternary optimisation of mineral additives of alkali activated cement mortars](#). *Construction and Building Materials*, 43:131–138.
- [33] Neto, A. A. M., Cincotto, M. A., Repette, W. (2008). [Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement](#). *Cement and Concrete Research*, 38(4):565–574.