



ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE PREPARED WITH TREATED SUGARCANE BAGASSE ASH AS A PARTIAL CEMENT REPLACEMENT

Duc Hien Le^{1,*}, Yeong Nain Sheen

¹Faculty of Civil Engineering, Ton Duc Thang University, No 19 Nguyen Huu Tho Street, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, No 415 Jiangong Rd., Kaohsiung City, Taiwan

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 09/11/2021

Revised: 25/04/2022

Accepted: 14/07/2022

Published online: 15/08/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.6.3>

* *Corresponding author*

Email: leduchien@tdtu.edu.vn; Tel: +84908120937

Abstract. Cement production is causing serious impacts to the environment due to CO₂ emission to the atmosphere. The utilization of mineral admixtures, sourced from industrial, agricultural processes such as slag, fly ash, rice-husk ash...in blends with Portland cement has been widely accepted to lessen that concern. Sugarcane bagasse ash (SBA) –a by product of combustion of bagasse in boiler, is potentially used in that way. The present study addresses to enhance suitability of SBA as a partial cement replacement (5%, 10%, 15%, 20%, by mass) concrete compositions. For this purpose, SBA was treated by burning in a furnace at 700 °C for 1 h before use. Physical and chemical characteristics of the resulting ash were characterized, and engineering properties of the SBA-blended concretes have been investigated. The testing results show that, treated SBA is silica-rich in amorphous form. Portland cement being replaced by SBA at level of 10% or greater causes a significant drop in slump of blended concrete. Increasing amount of SBA to replace cement results in reduction of mechanical strengths at any testing ages. In addition, there is minor difference in water absorption among all concrete mixtures after 91 days of curing. The mechanical strengths and the internal porosity of concrete are inversely correlated.

Keywords: sugarcane bagasse ash, mineral admixture, compressive strength, water absorption, porosity.



MỘT SỐ ĐẶC TÍNH KỸ THUẬT CỦA BÊ TÔNG SỬ DỤNG TRO BÃ MÍA ĐÃ XỬ LÝ THAY THẾ MỘT PHẦN XI MĂNG

Lê Đức Hiền^{1,*}, Sheen Yeong-Nain

¹Khoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Số 19 Nguyễn Hữu Thọ, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Khoa Xây dựng, Trường Đại học Quốc lập Khoa học kỹ thuật Cao Hùng, Số 415 Jiangong Rd., Tp. Cao Hùng, Đài Loan

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 09/11/2021

Ngày nhận bài sửa: 25/04/2022

/Ngày chấp nhận đăng: 14/07/2022

Ngày xuất bản Online: 15/08/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.6.3>

* Tác giả liên hệ

Email: leduchien@tdtu.edu.vn; Tel: +84908120937

Tóm tắt. Sản xuất xi măng từ clinker thải ra nhiều khí cacbonic (CO₂) vào khí quyển, gây ô nhiễm môi trường. Sử dụng kết hợp vật liệu phụ gia khoáng, có nguồn gốc từ phụ phẩm của quá trình sản xuất công, nông nghiệp như xỉ lò cao nghiền mịn, tro bay, tro trấu... với xi măng góp phần giảm phát thải khí nhà kính. Tro bã mía (SBA) – một phế phẩm của quá trình đốt bã mía trong lò cao, là một vật liệu có thể sử dụng với mục đích như vậy. Trong bài báo này, tro bã mía, sau khi nung ở nhiệt độ 700 °C trong 1 giờ, được dùng thay thế xi măng với các tỷ lệ khối lượng khác nhau (5%, 10%, 15% và 20%) để chế tạo bê tông. Mẫu vật liệu tro được phân tích đặc tính lý hóa, và một số đặc tính kỹ thuật của bê tông được khảo sát. Kết quả cho thấy, vật liệu SBA chứa nhiều thành phần silic hoạt tính, có cấu trúc vô định hình. Thay thế xi măng bởi SBA từ 10% khối lượng trở lên làm cho tính công tác của bê tông giảm nhanh. Tăng dần tỷ lệ SBA trong hỗn hợp dẫn đến giảm dần cường độ chịu kéo, nén ở tất cả các thời điểm thí nghiệm. Ngoài ra, độ hút nước của các cấp phối bê tông sau 91 ngày tuổi không có sự thay đổi lớn. Cường độ kéo, nén của bê tông chứa vật liệu SBA được xác nhận có quan hệ tỷ lệ nghịch với độ rỗng bên trong cấu trúc.

Từ khóa: tro bã mía, phụ gia khoáng, cường độ chịu nén, độ hút nước, độ rỗng.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xi măng Pooc lăng là một trong những thành phần vật liệu quan trọng trong lĩnh vực xây dựng nói chung. Sản xuất xi măng từ clinker thải ra nhiều khí CO₂ vào khí quyển, gây ô nhiễm môi trường. Ước tính có khoảng 8–10% lượng CO₂ trên thế giới sinh ra từ ngành công nghiệp xi măng [1]. Gần đây, việc nghiên cứu sử dụng vật liệu thay thế xi măng bởi thành phần phụ gia khoáng, có nguồn gốc từ phụ phẩm của các ngành công, nông nghiệp như xỉ lò cao nghiền mịn, tro bay, tro trấu, tro bã mía được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, nhằm gián tiếp giảm lượng phát thải khí nhà kính, hướng đến phát triển “xanh” và bền vững [1, 2]. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng, độ bền lâu và độ bền cơ học của bê tông chứa thành phần phụ gia khoáng (xỉ lò cao, tro bay) được cải thiện đáng kể; khắc phục được những nhược điểm cố hữu của bê tông xi măng như tỏa nhiều nhiệt, co ngót lớn và suy giảm độ bền lâu trong môi trường xâm thực [3].

Cây mía đường là một trong những cây trồng truyền thống và phổ biến ở Việt Nam cũng như một số nước nhiệt đới khác. Theo hiệp hội mía đường Việt Nam (VSSA) [4], 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 sau quá trình ép lấy nước đường từ cây mía; và có khoảng 80% trong số này được đốt trong các lò hơi của các nhà máy đường để sản xuất điện sinh khối [5]. Chất thải rắn trong quá trình này là tro bã mía (*sugarcane bagasse ash* –SBA). Ước tính có khoảng 50 ngàn tấn tro bã mía được thải ra từ các nhà máy đường trên cả nước, chất đông 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), tro bã mía chứa các thành phần ô-xít quan trọng như silic, nhôm, canxi. 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 trong và ngoài nước thực hiện, mang lại một số kết quả bước đầu [6-8]. Khảo sát cho thấy, 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 [7]. Về cơ bản, tro bã mía từ các bãi thải chứa thành phần tro đã cháy hết và chưa cháy hết, đôi khi còn pha lẫn tạp chất hữu cơ khác. Lượng mất khi nung (MKN) thường tìm thấy với tỷ lệ cao trong thành phần tro thô do chứa nhiều cacbon chưa cháy hết, có thể lên đến 20% [9]. Đa số tro này đều không phù hợp để sử dụng trực tiếp như một thành phần của hỗn hợp bê tông (gây phân tầng, chứa nhiều lỗ rỗng và cường độ thấp). Một số phương pháp nâng cao độ hoạt tính của tro bã mía trước khi sử dụng như xử lý nhiệt (nung), nghiền mịn, rây sàng hoặc kết hợp giữa các cách trên đã được nghiên cứu thành công [7, 10, 11]. Tuy nhiên, các phương pháp xử lý tro nêu trên thường làm tăng chi phí vật liệu và tiêu thụ nhiều năng lượng xử lý.

Hệ chất kết dính xi măng –tro bã mía có lượng nước tiêu chuẩn cao hơn so với xi măng. Vì thế, hỗn hợp bê tông chứa vật liệu SBA có nhu cầu lượng nước trộn nhiều hơn để duy trì độ lưu động cần thiết [7]. Lý do được giải thích là tro thường có tỷ diện lớn hơn xi măng và đặc tính hút nước vào các cấu trúc rỗng. Một số nghiên cứu chỉ ra rằng, sử dụng với một tỷ lệ vừa phải tro bã mía thay thế xi măng (thường từ 5–10%) có thể nâng cao độ bền cơ học so với mẫu bê tông xi măng đối chứng. Chẳng hạn, Amin [12] cho rằng bê tông sử dụng hệ chất kết

dính xi măng –tro bã mía đạt cường độ nén cao nhất khi lượng SBA đạt mức 10%. Tương tự, một nghiên cứu của Jagadesh và cộng sự [13] cho thấy, cấp phối bê tông chứa 10% SBA+90% xi măng có cường độ tăng 27,8% (khi nén) và 13,8% (khi kéo) so với bê tông xi măng. Ngoài ra, độ bền lâu của bê tông cũng được cải thiện khi có mặt thành phần SBA trong hỗn hợp. Gần đây, nghiên cứu của Bayapureddy và cộng sự [6] đã khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ vật liệu SBA (thay đổi từ 5–20%, mức tăng 5%) đến độ hút nước, độ xâm nhập và dịch chuyển ion clo. Kết quả thu được cho thấy, mẫu bê tông chứa 15% SBA có độ bền cao nhất ở 28 và 56 ngày.

Ở Việt Nam, hiện có rất ít nghiên cứu về loại tro phế thải rắn này áp dụng trong lĩnh vực xây dựng được ghi nhận; phần lớn tro bã mía được dùng làm sản xuất phân bón [5]. Trong bài báo này, tro bã mía thu thập từ một nhà máy đường ở phía Nam được thu thập và nghiên cứu sử dụng như một thành phần thay thế xi măng trong hỗn hợp bê tông. Trong nhiều nghiên cứu trước, tro được xử lý bằng cách kết hợp nghiền mịn đến rất mịn và nung đến nhiệt độ khoảng 600–800 °C, đã được chứng minh nâng cao tính năng của bê tông. Tuy vậy, cách xử lý như trên tốn nhiều chi phí và năng lượng. Trong nghiên cứu này, kết hợp biện pháp rây sàng (qua rây có đường kính 0,15 mm) và nung đến nhiệt độ 700 °C trong 1 giờ được đề xuất để xử lý tro trước khi dùng chung với xi măng. Các chỉ tiêu kỹ thuật (ở trạng thái ướt và khô) của bê tông chứa các tỷ lệ tro bã mía thay thế xi măng khác nhau được khảo sát. Từ đó, nghiên cứu sẽ đề xuất cách xử lý và tỷ lệ sử dụng hợp lý của tro bã mía.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu sử dụng

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm: xi măng Poóc lăng, tro bã mía, cát sông, đá dăm, phụ gia hóa dẻo và nước.

2.1.1. Tro bã mía (SBA) và phương pháp nghiên cứu các đặc tính của SBA

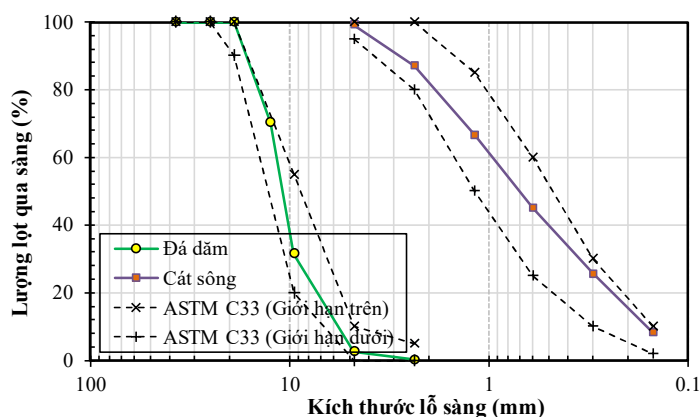
Trong nghiên cứu này, tro bã mía được thu thập từ bãi tro phế thải lộ thiên của nhà máy đường Sóc Trăng (Tỉnh Sóc Trăng). Mẫu tro được sấy khô ở 110 °C trong 24 giờ đến khối lượng không đổi, trước khi rây qua sàng có kích thước lỗ 0,15 mm nhằm loại bỏ tạp chất và thành phần tro chưa cháy hết. Phần tro mịn thu được (lọt qua sàng 0,15 mm) đem xử lý nhiệt bằng cách nung trong lò kín ở 700 °C trong 1 giờ để nâng cao độ hoạt tính của tro. Cách thức xử lý tro bã mía này được nhóm nghiên cứu tham khảo từ nghiên cứu trước [11], có điều chỉnh nhiệt độ và thời gian nung cho phù hợp. Tiếp theo, tro được làm nguội nhanh về nhiệt độ phòng, và chứa trong các túi ni lông cách ẩm dùng cho nghiên cứu.

Các đặc trưng lý, hóa của tro bã mía sau khi nung được khảo sát, bao gồm: phương pháp chụp ảnh hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscope –SEM) để xác định trạng thái bề mặt vật liệu; phân tích huỳnh quang tia X (X-ray fluoresce –XRF) xác định thành phần ô-xít và phương pháp nhiễu xạ tia X (X-ray diffraction –XRD) để phân tích cấu trúc tinh thể của

vật liệu SBA. Ngoài ra, độ mịn, lượng nước tiêu chuẩn, khối lượng riêng... của tro bã mía cũng được xác định.

2.1.2. Cốt liệu cho bê tông

Cốt liệu lớn bê tông làm từ đá dăm nghiền, có thành phần cấp phối hạt phù hợp cho sản xuất bê tông. Đá dăm có kích thước hạt lớn nhất (D_{max}) 37,5 mm. Cốt liệu nhỏ sử dụng từ cát sông có thành phần hạt phù hợp cho bê tông, với mô-đun độ lớn 2,2. Thành phần hạt của đá dăm và cát được biểu diễn ở Hình 1. Đá dăm và cát sử dụng có độ hút nước lần lượt là 1,36% và 1,6%; tỷ trọng đá dăm 2,65 và của cát là 2,64.



Hình 1. Thành phần cấp phối hạt của đá dăm và cát dùng cho thí nghiệm.

2.1.3. Xi măng: sử dụng xi măng PC40 Nghi Sơn, có tỷ diện $3480 \text{ cm}^2/\text{g}$ và tỷ trọng 3,15.

2.1.4. Phụ gia siêu dẻo: phụ gia Sika Plast 204 có nguồn gốc polycarboxylate, phù hợp với ASTM C494 loại G, có khối lượng thể tích 1,105–1,125 kg/lít (tại 20 °C), pH =4,5–6,0 được sử dụng để duy trì tính công tác của hỗn hợp bê tông.

Nước trộn bê tông là nước sạch, lấy tại vòi nước trong phòng thí nghiệm.

2.2. Thành phần cấp phối của bê tông và chuẩn bị mẫu thử

Bảng 1 trình bày thành phần vật liệu cho 1 m^3 bê tông dùng cho nghiên cứu. Tỷ số khối lượng nước/ chất kết dính (N/CKD) được chọn 0,5 cho tất cả các cấp phối. Vật liệu SBA được sử dụng thay thế xi măng với các tỷ lệ khối lượng 5%, 10%, 15%, và 20%. Lượng phụ gia được sử dụng cố định cho các hỗn hợp với tỷ lệ 1,2% khối lượng chất kết dính để đánh giá ảnh hưởng của vật liệu tro đến tính công tác của hỗn hợp bê tông.

Bảng 1. Thành phần vật liệu cho các hỗn hợp vữa và bê tông dùng trong thí nghiệm.

Ký hiệu hỗn hợp	N/CKD	SBA (%)	XM (%)	Thành phần vật liệu hỗn hợp vữa (g)		Thành phần vật liệu cho 1 m^3 bê tông (kg/m^3)			
				CKD	Cát sông	Cát sông	Đá dăm	Nước	Phụ gia
SBA00	0,5	0	100	500	1375	674	1201	164	3,94

(đôi chứng)					
SBA05	5	95	500	1375	670
SBA10	10	90	500	1375	666
SBA15	15	85	500	1375	662
SBA20	20	80	500	1375	658

Ghi chú: N/CKD , tỷ số nước/chất kết dính (gồm XM+ SBA); SBA –vật liệu tro bã mía; XM –xi măng.

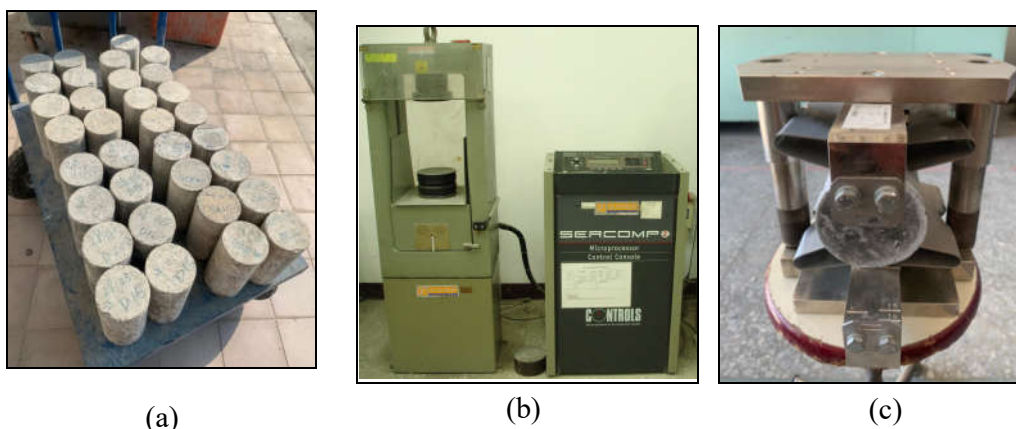
2.3. Các phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Thí nghiệm bê tông ở trạng thái ướt

Ngay sau khi trộn xong mỗi hỗn hợp bê tông, độ sụt và khối lượng thể tích của bê tông tươi được xác định lần lượt theo các tiêu chuẩn ASTM C143 và ASTM C138. Cón hình nón cụt có kích thước tiêu chuẩn $100 \times 200 \times 300$ mm được sử dụng để xác định độ sụt của khối bê tông sau khi rút dụng cụ cón có chứa bê tông theo phương thẳng đứng.

2.3.2. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén và kéo của bê tông

Mẫu trụ tròn đường kính 100 mm và chiều cao 200 mm được sử dụng để xác định cường độ chịu nén và kéo khi ép chế của bê tông theo tiêu chuẩn ASTM C39 [14] và C496 [15], như trên Hình 2. Các thí nghiệm trên được tiến hành trên máy nén UTM (Universal Testing Machine) ở các thời điểm mẫu đạt 7, 28, 56, và 91 ngày tuổi. Tốc độ gia tải khi nén được thiết lập ở mức 0.9 kN/giây. Mỗi thí nghiệm được tiến hành trên 3 lần thử và kết quả được lấy theo giá trị trung bình của các lần thực hiện. Tổng cộng có 120 mẫu ($=2 \times 3 \times 4 \times 5$) được chuẩn bị để xác định cường độ chịu kéo và nén.



Hình 2. (a) Mẫu trụ tròn 100 mmx 200 mm; (b) thiết thí nghiệm bị nén; và (c) dụng cụ ép chế mẫu trụ tròn.

2.3.3. Vận tốc sóng siêu âm

Trước khi tiến hành thí nghiệm nén mẫu, đo vận tốc sóng siêu âm (*ultrasonic pulse velocity –UPV*) truyền trực tiếp xuyên qua mẫu thử được tiến hành với thiết bị Pundit Lab

(Proceq, Thụy Sỹ), phù hợp với ASTM C597 [16]. Thời gian truyền của xung (T) qua mẫu bê tông đo được nhờ các mạch điện đếm thời gian. Vận tốc xung được tính theo công thức, $UPV = \frac{L}{T}$, (m/s) (với L chiều dài mẫu mà xung siêu âm truyền qua). Mỗi thí nghiệm được tiến hành trên 3 mẫu thử và kết quả được lấy theo giá trị trung bình của các lần đo.

2.3.4. Độ hút nước

Độ hút nước được xác định theo ASTM C642 [17]. Mẫu trụ tròn có đường kính 100 mm và chiều cao 200 mm được sử dụng để đánh giá độ hút nước cho các cấp phối bê tông ở 7, 28, 56, và 91 ngày tuổi. Theo đó, khi đến thời điểm thí nghiệm, mẫu lấy ra từ bể dưỡng hộ được sấy trong tủ sấy ở nhiệt độ 105–110 °C đến khối lượng không đổi (thường mất khoảng 48 giờ). Mẫu sấy khô được làm nguội và cân trước khi ngâm trong nước trong 24 giờ tiếp theo. Độ hút nước được tính bằng phần trăm khối lượng nước bị hấp thụ so với khối lượng mẫu khô. Mỗi phép đo được thực hiện trên 3 mẫu thử và giá trị trung bình của các lần đo được ghi nhận.

2.3.5. Độ rỗng

Độ rỗng của vật liệu có liên quan trực tiếp đến độ bền cơ học và độ bền theo thời gian. Kích thước, phân bố và mức độ liên thông nhau của hệ thống lỗ rỗng liên quan trực tiếp đến tính thấm của bê tông. Do đó, ảnh hưởng đến độ bền lâu khi tiếp xúc với môi trường xâm thực. Trong nghiên cứu này, độ rỗng bên trong cấu trúc của bê tông sau 56 ngày tuổi được đánh giá bằng kỹ thuật hiển vi quang học (*optical microscopy* –OM). Một thiết bị kính hiển vi Monocular Microscope (FRS-1000, có độ phóng đại đến 400X) kết nối với bộ xử lý kỹ thuật số được sử dụng để đánh giá định lượng tỷ số rỗng bề mặt mẫu (pore ratio), được định nghĩa là tỷ số phần trăm giữa tổng diện tích bề mặt các lỗ rỗng đối với tổng diện tích bề mặt mẫu trong phạm vi quan sát. Mẫu dùng để xác định độ rỗng lấy từ mảnh vỡ bê tông sau khi nén mẫu trụ tròn và gia công với kích thước khoảng 2 cm × 3 cm, dày 10-15 mm (lấy bằng nửa đường kính mẫu). Mẫu được đánh bóng để loại bỏ các vết xước tạo ra từ công đoạn mài mẫu. Trước khi đánh bóng mịn, mẫu phải được rửa kỹ bằng nước xà phòng ấm và sau đó là cồn.

3. KẾT QUẢ VÀ CÁC PHÂN TÍCH

3.1. Phân tích đặc tính tro bã mía trước/ sau khi nung

Bảng 2 trình bày thành phần ô-xít có trong tro bã mía dùng trong thí nghiệm, so sánh với thành phần của xi măng. Dễ thấy rằng, SBA có đầy đủ các thành phần ô-xít quan trọng của vật liệu pozzolan thông thường như: ô-xít silic (SiO_2), ô-xít nhôm (Al_2O_3), ô-xít sắt (Fe_2O_3)..., và thành phần cacbon chưa cháy hết (đánh giá thông qua hàm lượng mất khi nung –MKN). Trong đó, thành phần SiO_2 là chủ yếu (chiếm trên 75%), do đặc điểm tích lũy silic của cây mía đường [18]. Tro bã mía trong dùng trong nghiên cứu này có lượng MKN khá cao so với qui định của ASTM C618 đối với vật liệu pozzolan ($\leq 10\%$). Lượng MKN đối với mẫu tro trước khi xử lý nhiệt là 19,7% và giảm xuống còn 14,3% sau khi nung ở 700 °C trong 1

giờ (xem Bảng 2). Hàm lượng MKN cao được giải thích do chứa nhiều thành phần cacbon chưa cháy hết – đặc trưng bởi mẫu tro thô có màu đen. Kết quả phân tích này tương đồng với tro bã mía dùng trong nghiên cứu trước ở trong nước [18] và ở Thái Lan [9]. Các tính chất vật lý khác của vật liệu SBA trình bày trên Bảng 3. So với xi măng, SBA có tỷ diện bề mặt nhỏ hơn ($2260 \text{ cm}^2/\text{g}$ so với $3480 \text{ cm}^2/\text{g}$ của xi măng), tỷ trọng nhỏ hơn (2,44 so với 3,15). Lượng nước tiêu chuẩn được xác định theo ASTM C187 đối với hỗn hợp tro bã mía và xi măng trộn theo tỷ lệ khối lượng 0,2N:0,8 (với N là tỷ số khối lượng riêng giữa SBA và xi măng). Lượng nước trộn (tính bằng phần trăm khối lượng hỗn hợp xi măng và SBA) khi hồ xi măng–tro bã mía đạt độ dẻo tiêu chuẩn (xác định bằng dụng cụ Vicat) được xem là lượng nước tiêu chuẩn. Kết quả Bảng 3 cho thấy lượng nước tiêu chuẩn 29% đối với mẫu xi măng và 55% đối với mẫu hỗn hợp xi măng–SBA. Sự có mặt của thành phần tro chưa cháy hết có thể là nguyên nhân làm tăng lượng nước trộn yêu cầu để hỗn hợp đạt được độ dẻo tiêu chuẩn [11].

Ảnh SEM trên Hình 3(a) mô tả hình thái bề mặt hạt tro bã mía. Đường kính hạt có kích thước μm không đồng đều, hình dạng không đồng nhất (khác biệt với tro bay), cấu trúc xốp và có nhiều lỗ rỗng. Vì thế, vật liệu tro bã mía hấp thụ nhiều nước (“háo nước”).

Hình ảnh phổ nhiễu xạ tia X của vật liệu tro trên Hình 3(b) cho thấy pha tồn tại chính của SiO_2 dạng quartz ($\alpha\text{-SiO}_2$) và Cristobalite ($\beta\text{-SiO}_2$), có đỉnh phổ nằm trong khoảng $20\text{--}30^\circ$ (góc 2θ). Vật liệu SBA cấu trúc tinh thể vô định hình, có độ hoạt tính cao, nên dễ tham gia các phản ứng pozzolanic [11, 19].

Bảng 2. Thành phần hóa học của xi măng và tro bã mía dùng trong thí nghiệm.

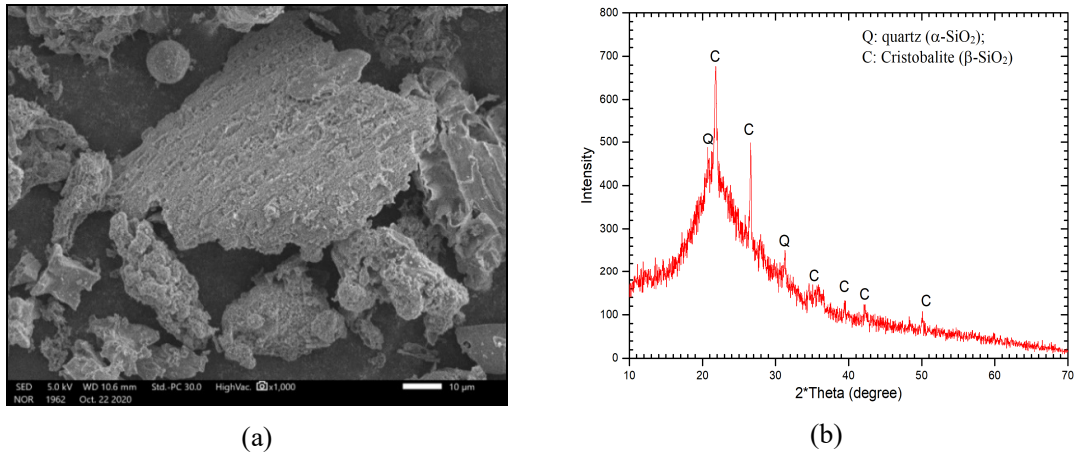
Vật liệu	Thành phần ô-xít (%)											MKN ^a (%)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	SrO	MnO_2	Na_2O	K_2O	
OPC	20,7	4,5	3,3	63,0	1,8	-	-	-	-	0,10	0,74	2,8
SBA	74,94	6,48	2,14	1,42	1,13	0,40	0,78	0,016	0,56	0,78	2,75	19,7 (14,3 ^b)

^a MKN (lượng mất khi nung, nhiệt độ nung 950°C đối với xi măng và 750°C đối với tro bã mía);

^b MKN đối với mẫu tro trước khi xử lý nhiệt là 19,7% và giảm xuống còn 14,3% sau khi nung ở 700°C .

Bảng 3. Tính chất vật lý của xi măng và tro bã mía dùng trong thí nghiệm.

Tính chất	Vật liệu xi măng	Vật liệu SBA (sau khi nung ở 700°C trong 1 giờ)
Khối lượng riêng, g/cm^3	3,15	2,44
Tỷ diện (Độ mịn Blaine), cm^2/g	3480	2260
Lượng nước tiêu chuẩn, %	29	55
Thời gian bắt đầu ninh kết (phút)	136	-
Thời gian kết thúc ninh kết (phút)	185	-



Hình 3. Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) và phổ nhiễu xạ tia X (XRD) của vật liệu tro bã mía dùng trong thí nghiệm.

3.2. Chỉ số hoạt tính cường độ của vữa xi măng-SBA

Độ hoạt tính của vật liệu SBA trong hệ chất kết dính xi măng-SBA được đánh giá thông qua chỉ số hoạt tính cường độ vữa (*strength activity index* –SAI), theo ASTM C311 [20]. Chỉ số SAI được xác định bằng phần trăm cường độ trung bình của mẫu vữa sử dụng chất kết dính hỗn hợp xi măng-SBA so với mẫu vữa xi măng đối chứng (không chứa vật liệu SBA), xác định ở 28 ngày tuổi. Bảng 1 trình bày khối lượng vật liệu cần thiết mỗi mẻ trộn để đúc 6 mẫu vữa lập phương cạnh 50 mm. Tỷ lệ nước/chất kết dính 0,5, lấy theo tỷ lệ tương ứng của hỗn hợp bê tông. Tỷ lệ chất kết dính: cát sông lấy bằng 1:2,75 (theo khối lượng), theo ASTM C109 [21]. Chuẩn bị khuôn, đúc mẫu vữa theo hướng dẫn ASTM C109. Sau 24 giờ kể từ khi đúc, mẫu được tháo khỏi khuôn và ngâm dưỡng hộ trong nước vôi đến khi thí nghiệm (28 ngày tuổi).

Bảng 4. Kết quả chỉ số hoạt tính cường độ (SAI) của vữa xi măng-SBA.

% Xi măng	% SBA	N/CKD	Chỉ số hoạt tính, SAI (%)
			28 ngày
100 (đối chứng)	0		100,00
95	5		98,52
90	10	0,5	90,66
85	15		80,27
80	20		67,14* (< 75%)

Kết quả thí nghiệm chỉ số hoạt tính cường độ vữa (SAI) với các thành phần SBA khác nhau ở 28 ngày được liệt kê ở Bảng 4. Nhận xét rằng, mẫu chứa 5% SBA đạt có chỉ số SAI cao nhất 98% và giảm dần xuống 67% đối với mẫu vữa chứa 20% SBA. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Arif và cộng sự [22]. Các tác giả đã có báo cáo rằng chỉ số SAI thay đổi từ 96% xuống 72% khi tăng tỷ lệ SBA thay thế xi măng trong hỗn hợp từ 5% đến 20%. Sự “pha loãng” do thiếu hụt xi măng, làm chậm lại quá trình thủy hóa xi măng tạo canxi hydroxit cho phản ứng với SBA có thể được giải thích cho hiện tượng giảm chỉ số SAI nêu trên.

Tiêu chuẩn ASTM 618 yêu cầu vật liệu pozzolan phải có chỉ số SAI tối thiểu đạt 75%. Do vậy, giới hạn sử dụng như vật liệu thay thế cho xi măng của vật liệu SBA là 15% (với 20% SBA, chỉ số SAI đạt 67%).

3.3. Độ sụt và khối lượng thể tích ướt của bê tông

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm độ sụt và khối lượng thể tích ướt của các hỗn hợp bê tông.

Ký hiệu hỗn hợp	Độ sụt (cm)	Khối lượng thể tích ướt (kg/m^3)
SBA00	20	2257
SBA05	22	2243
SBA10	17	2239
SBA15	12,5	2236
SBA20	9	2224

Kết quả ở Bảng 5 cho thấy hỗn hợp chứa 5% SBA có độ linh động cao nhất (độ sụt 22 cm) tiếp theo đến mẫu tham chiếu với 100% xi măng (độ sụt 20 cm). Điều này cho thấy có thể sử dụng vật liệu SBA với tỷ lệ phù hợp đóng vai trò như một loại phụ gia tăng độ dẻo cho hỗn hợp bê tông. Tính chất này tương tự như đối với tro bay, với cấu trúc hạt hình cầu. Tuy có hình dáng trạng thái bề mặt khác với tro bay, hạt SBA có cấu trúc bề mặt nhẵn (glassy), có thể là nguyên nhân làm tăng tính công tác của hỗn hợp [23]. Tuy nhiên, khi lượng SBA thay thế xi măng tiếp tục tăng (từ 10% trở lên), hỗn hợp có độ sụt giảm sâu. Cấp phối chứa 20% SBA có độ sụt thấp nhất (9 cm). Lý do cho sự giảm trên được giải thích do hình dạng đa dạng và kích không đồng nhất của vật liệu SBA, làm tăng ma sát giữa các hạt thành phần. Thêm vào đó, bề mặt với nhiều lỗ rỗng trong cấu trúc của hạt tro bã mía làm cho vật liệu này hút nhiều nước. Từ đó, độ sụt hỗn hợp giảm. Có thể tìm thấy kết quả tương tự trong các nghiên cứu trước đây [7].

Hỗn hợp bê tông tươi có khối lượng thể tích trong khoảng 2224–2257 kg/m^3 , như trình bày trên Bảng 5. Dễ thấy rằng, khối lượng thể tích giảm khi tỷ lệ SBA tăng lên, do tỷ trọng của SBA (2,44) nhỏ hơn so với xi măng (3,15). Khi thay đổi xi măng bởi vật liệu SBA cùng khối lượng thì thể tích chiếm chỗ của SBA trong hỗn hợp nhiều hơn.

3.4. Cường độ chịu nén của bê tông

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén ($f_{c,t}$) của mẫu bê tông chứa các thành phần SBA khác nhau được thể hiện trên Bảng 6. Tất cả các cấp phối bê tông có chứa thành phần SBA đạt cường độ trên 40 MPa sau 7 ngày và trên 50 MPa sau 91 ngày. Các hỗn hợp đều có cường độ tăng dần theo thời gian do quá trình hydrate hóa của xi măng hoặc của tổ hợp chất kết dính xi măng–SBA. Nhóm mẫu đối chứng (ký hiệu SBA00) có cường độ sau 7 ngày đạt 85% so với giá trị cường độ 28 ngày. Trong khi đó, nhóm mẫu chứa 20% SBA thay thế xi măng sau 7 ngày có cường độ chịu nén đạt được 97% cường độ sau 28 ngày, thể hiện sự phát triển nhanh cường độ hơn so với bê tông thường, ngay cả khi dưỡng hộ trong điều kiện bình thường.

Bảng 6. Kết quả cường độ chịu nén [% giảm cường độ so với mẫu đối chứng].

Ký hiệu	Cường độ chịu nén (MPa)			
	7 ngày	28 ngày	56 ngày	91 ngày
SBA00	48,73±3,99 ^a [0] ^b	57,23±3,58 [0]	58,94±4,17 [0]	65,75±5,26 [0]
SBA05	43,69±3,50 [10]	47,48±3,60 [17]	49,62±3,26 [16]	61,30±4,04 [7]
SBA10	42,93±3,43 [12]	47,08±3,77 [18]	48,84±3,21 [17]	55,91±4,47 [15]
SBA15	42,34±3,39 [13]	45,15±3,46 [21]	46,38±3,27 [21]	55,41±4,53 [16]
SBA20	42,09±3,37 [14]	43,58±3,49 [24]	45,98±3,27 [22]	53,93±4,31 [18]

Ghi chú:

^(a), Giá trị độ lệch chuẩn của kết quả thí nghiệm;

^(b), Giá trị trong dấu ngoặc vuông [-] chỉ phần trăm giảm cường độ so với mẫu đối chứng (SBA00) khi thay đổi tỷ lệ SBA.

So với bê tông đối chứng chỉ có xi măng là chất kết dính, bê tông chứa SBA thay thế xi măng có cường độ thấp hơn ở các thời điểm thí nghiệm; giá trị f_{cs} giảm dần cùng với sự tăng lên của thành phần SBA trong hỗn hợp. Bảng 6 trình bày phần trăm mức giảm cường độ chịu nén của bê tông chứa tro bã mía so với bê tông đối chứng, với mức giảm ghi nhận được trong khoảng 7–24%. Mẫu chứa 20% SBA có cường độ chịu nén giảm 24% và 18% so với mẫu đối chứng lần lượt sau 28 và 91 ngày. Kết quả này phù hợp với sự giảm dần độ hoạt tính của tro bã mía khi tỷ lệ SBA tăng lên, xác định ở trên và tương tự như đối với một số nghiên cứu trước đây [24].

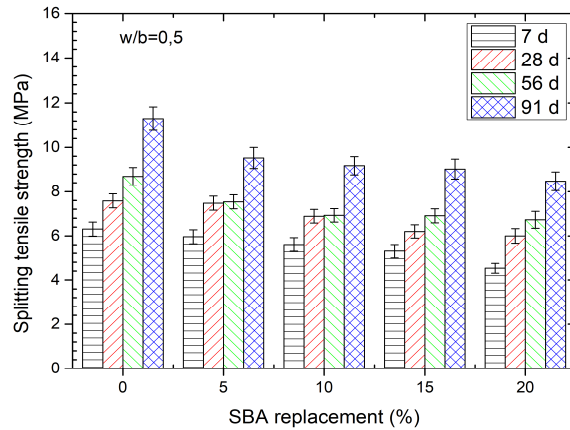
Tuy nhiên, một số nghiên cứu khác [10, 22] chỉ ra rằng, tổ hợp chất kết dính xi măng với dưới 10% SBA (thậm chí đến 15%) có thể nâng cao cường độ và độ bền vững theo thời gian của bê tông. Trong hệ chất kết dính xi măng –SBA, hydroxit canxi [Ca(OH)₂, portlandite] sinh ra từ thủy hóa xi măng phản ứng với silic ô-xít (SiO₂) hoạt tính có trong tro bã mía (phản ứng pozzolanic), bổ sung sản phẩm hydrate (chẳng hạn như C-S-H gels) và thành phần này làm tăng tính chất cơ học và bền lâu của bê tông. Ngoài ra, sự lấp đầy lỗ rỗng của ma trận hồ xi măng và bề mặt hạt cốt liệu (vùng chuyển tiếp giữa hồ xi măng và cốt liệu) bởi các hạt tro mịn cũng được xem là một nguyên nhân khác làm tăng tính bền vững của bê tông do giảm đáng kể thể tích lỗ rỗng bê trong cấu trúc. Tuy thế, trong thí nghiệm này, sự có mặt của thành phần SBA làm cho cường độ suy giảm khi so sánh với mẫu đối chứng. Sự thiếu hụt Ca(OH)₂ (do giảm thành phần xi măng) cần thiết cho phản ứng pozzolanic, giảm lượng sản phẩm thủy hóa có thể được coi là nguyên nhân giảm cường độ [13].

3.5. Cường độ chịu kéo khi ép chẻ

Thí nghiệm cường độ chịu kéo khi ép chẻ (f_{sts}) được thực hiện trên mẫu trụ tròn 100 mm × 200 mm (đường kính × chiều cao). Giá trị f_{sts} được xác định bởi công thức (1):

$$f_{sts} = 2P/\pi ld \quad (1)$$

Trong đó, P - tải trọng gây phá hoại mẫu; l và d lần lượt là chiều cao và đường kính mẫu.



Hình 4. Cường độ chịu kéo của bê tông với các tỷ lệ vật liệu SBA khác nhau.

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu kéo khi ép chẻ (f_{sts}) ở các độ tuổi khác nhau (7, 28, 56 và 91 ngày) được trình bày trên Hình 4. Dễ thấy rằng, xu hướng sự thay đổi f_{sts} khá tương đồng với cường độ chịu nén f_{cs} , như đã phân tích ở trên. Tức là, f_{sts} cũng có xu thế giảm dần khi tỷ lệ SBA tăng lên. Điều này có thể được giải thích do SBA chưa phản ứng hết với hydroxit canxi hoặc do thiếu hụt hydroxit canxi cho phản ứng pozzolanic, từ đó giảm đi lượng sản phẩm hydrat hóa và giảm độ bền cơ học (kéo, nén) của bê tông [25]. Một điểm khác đáng lưu ý là mức độ giảm f_{sts} nhanh hơn so với f_{cs} . Cụ thể, khi lượng SBA tăng từ 5%, 10%, 15% và 20% cường độ chịu kéo mẫu ở 28 ngày tuổi giảm lần lượt 11%, 31%, 32%, và 36% so với cường độ mẫu đối chứng. Trong khi đó, độ giảm tương ứng của cường độ chịu nén là 17%, 18%, 21% và 24%. Mặt khác, kết quả thí nghiệm cho thấy, tỷ số $\frac{f_{sts}}{f_{cs}}$ được đánh giá trong khoảng 12–18% sau 56 ngày và 14–22% sau 91 ngày. Số liệu này lớn hơn đáng kể khi so sánh với các nghiên cứu trên bê tông sử dụng tro bã mía như một thành phần thay thế xi măng hoặc bê tông thường. Nhiều nghiên cứu [19, 23, 26, 27] đã xác nhận rằng tỷ số $\frac{f_{sts}}{f_{cs}}$ nằm trong khoảng 6–8% đối với mẫu sau 28 ngày tuổi.

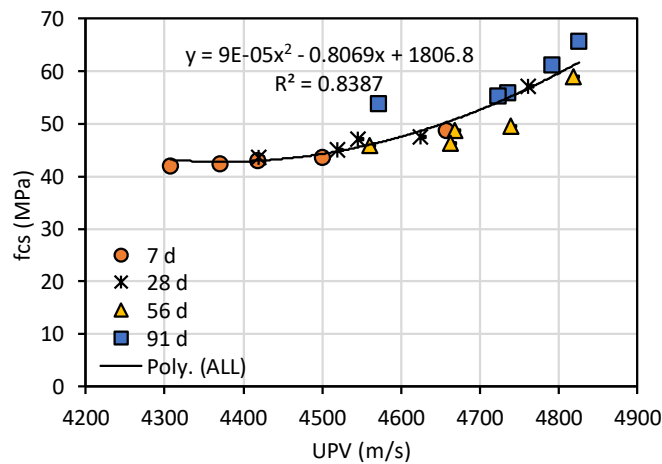
3.6. Vận tốc sóng siêu âm

Bảng 7. Kết quả đo vận tốc sóng siêu âm (m/s) và độ rỗng của bê tông.

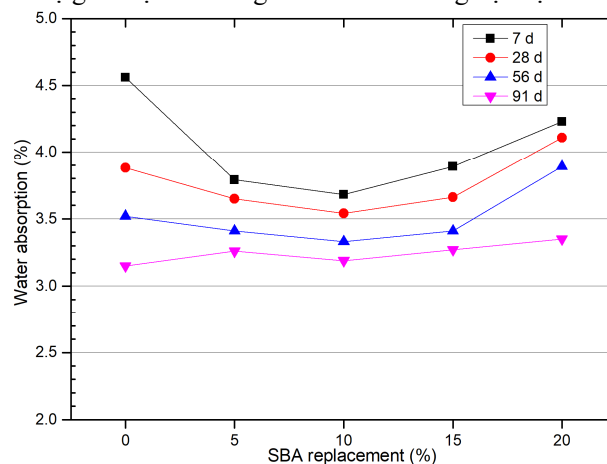
Ký hiệu	Vận tốc sóng siêu âm, UPV (m/s)				Độ rỗng (sau 56 ngày)
	7 ngày	28 ngày	56 ngày	91 ngày	
SBA00	4658	4762	4819	4825	2,16%
SBA05	4501	4625	4739	4791	2,75%
SBA10	4419	4545	4668	4735	3,73%,
SBA15	4370	4520	4663	4723	3,95%
SBA20	4307	4420	4561	4572	4,17%

Chỉ số vận tốc sóng siêu âm truyền qua vật liệu (UPV), thường được xem có liên quan đến độ bền cơ học của bê tông. Cụ thể, bê tông có cường độ càng cao, giá trị UPV càng lớn và

ngược lại. Các yếu tố ảnh hưởng đến cường độ của bê tông (như lượng xi măng, tỷ số nước/xi măng, cốt liệu,...) cũng có thể ảnh hưởng đến UPV, nhưng với các mức độ khác nhau [28]. Kết quả đo đạc UPV đối với các cấp phối bê tông khác nhau được trình bày ở Bảng 7. Từ bảng này cho thấy chỉ số UPV tăng dần theo thời gian cùng với quá trình thủy hóa hệ chất kết dính xi măng-SBA. Quá trình này làm giảm độ rỗng của cấu trúc bởi các sản phẩm hydrate hóa, từ đó chỉ số UPV tăng lên. Sau 56 ngày, tất cả các mẫu có vận tốc sóng đo được có giá trị lớn hơn 4500 m/s, được phân loại thuộc loại bê tông có độ đồng nhất (chất lượng) cao [2]. Bên cạnh đó, tỷ lệ vật liệu SBA thay thế xi măng có ảnh hưởng đến chỉ số UPV, tương tự như ảnh hưởng đối với độ bền cơ học. Khác với cường độ chịu nén/kéo, tăng tỷ lệ SBA đến 20% làm cho trị số UPV giảm nhẹ, khoảng 5% đối với mẫu sau 28 và 91 ngày tuổi. Thay đổi giảm UPV như trên phản ánh mẫu chứa SBA sẽ có nhiều thể tích lỗ rỗng hơn so với mẫu đối chứng; do đó, độ bền cơ học của bê tông chứa thành phần SBA giảm theo. Tuy vậy, giữa UPV và cường độ chịu nén (hoặc kéo) không nhất thiết giảm theo cùng một tỷ lệ. Thật vậy, dựa trên kết quả thí nghiệm, tương quan giữa UPV và f_{cs} được thiết lập theo đa thức bậc hai, như trên Hình 5.



Hình 5. Quan hệ giữa vận tốc sóng siêu âm và cường độ chịu nén của bê tông.

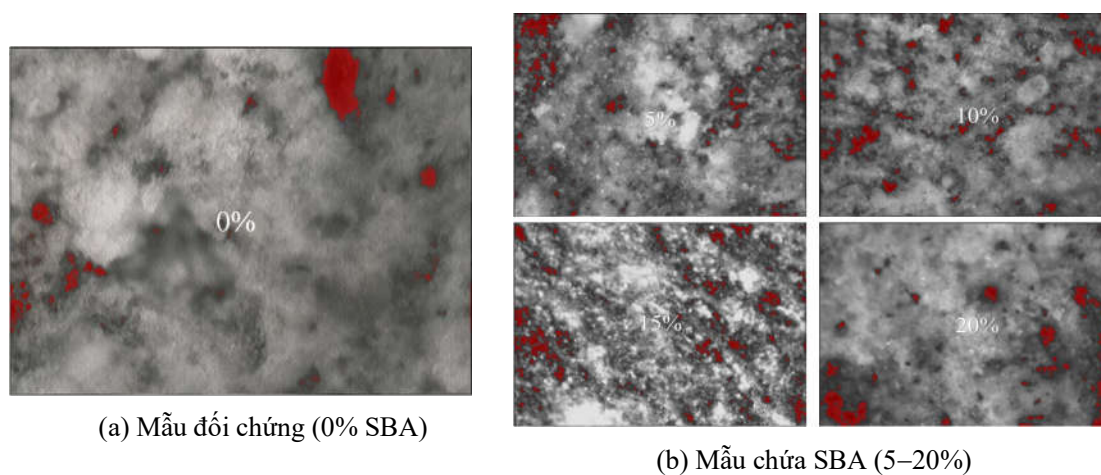


Hình 6. Độ hút nước của các hỗn hợp bê tông.

3.7. Độ hút nước của bê tông

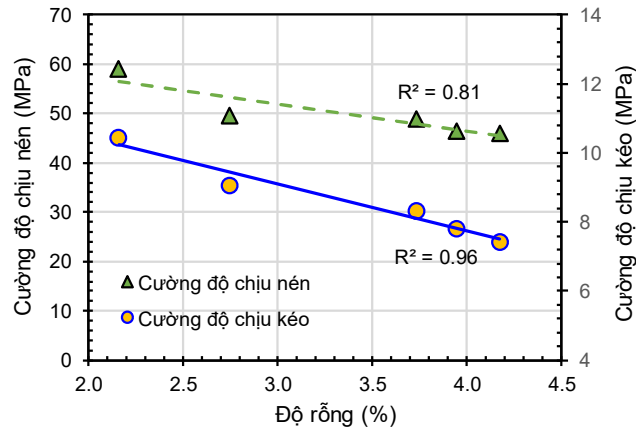
Với vật liệu gốc xi măng như bê tông, độ hút nước là một chỉ số thể hiện độ rỗng của cấu trúc vật liệu. Ở trạng thái bão hòa, nước được hấp thụ vào các lỗ bên trong mẫu bê tông. Sự thay đổi độ hút nước của các hỗn hợp bê tông theo tỷ lệ SBA và thời gian được biểu diễn trên Hình 6. Dễ nhận thấy rằng, khi tuổi bê tông tăng lên, độ hút nước giảm rõ rệt ở tất cả các cấp phối bê tông, do lỗ rỗng được điền đầy bởi sản phẩm của phản ứng thủy hóa hệ chất kết dính xi măng-SBA (C-S-H, C-A-S-H) và thành phần hạt mịn của tro bã mía (hiệu ứng “điền đầy”) [25]. Với sự hiện diện của hạt mịn SBA, các lỗ rỗng có đường kính lớn sẽ bị chia cắt thành nhiều lỗ rỗng có đường kính bé hơn, làm tăng khả năng có mặt của sản phẩm hydrate hóa [29]. Ở 7, 28, và 56 ngày tuổi, mẫu bê tông chứa 5–15% SBA có độ hút nước nhỏ hơn so với mẫu đối chứng (có độ hút nước 3,52–4,56%). Trong số các mẫu thí nghiệm, mẫu có cấp phối bê tông chứa 10% SBA (+ 90% xi măng) có độ hút nước nhỏ nhất. Tuy vậy, ở thời điểm 91 ngày, độ hút nước của các cấp phối bê tông không có sự thay đổi lớn (trong phạm vi 3–3,3%). Tức là, ảnh hưởng của thành phần SBA đến độ hút nước không đáng kể. Điều này cho thấy, vai trò của SBA trong việc giảm lỗ rỗng chủ yếu đóng góp từ hiệu ứng điền đầy hơn là từ phản ứng thủy hóa.

3.8. Độ rỗng của bê tông có chứa thành phần SBA



Hình 7. Hình ảnh quan sát độ rỗng (màu sẫm) quan sát qua kính hiển vi quang học (Độ phóng đại $\times 800$).

Trong thí nghiệm này, độ rỗng (trên bề mặt) của bê tông được xác định bằng một thiết bị quan sát kính hiển vi quang học Olympus BX51-P có kết nối với công cụ kỹ thuật số phân tích hình ảnh (digital acquisition). Theo đó, độ rỗng của mẫu vật liệu được đánh giá định lượng bằng tỷ số diện tích bề mặt của lỗ rỗng (đánh dấu bằng màu sẫm trên Hình 7) so với diện tích bề mặt mẫu quan sát. Kết quả đo độ rỗng mẫu bê tông thuộc các cấp phối khác nhau sau 56 ngày tuổi thể hiện trên Bảng 7. Từ kết quả này, mẫu đối chứng có độ rỗng thấp nhất 2,16%; khi tỷ lệ SBA tăng lên 5%, 10%, 15% và 20%, tỷ số rỗng xác định được lần lượt là 2,75%, 3,73%, 3,95% và 4,17%, mức tăng tương ứng 27%, 73%, 83%, 93% so với mẫu bê tông đối chứng.



Hình 8. Quan hệ giữa độ rỗng với cường độ chịu nén, kéo của bê tông.

Về mặt vật lý, độ rỗng cấu trúc của có quan hệ tỷ lệ nghịch với cường độ và độ bền theo thời gian của vật liệu bê tông [30]. Từ kết quả thí nghiệm, quan hệ giữa cường độ chịu nén/kéo với độ rỗng được mô tả trên Hình 8; trong đó, cường độ kéo/ nén giảm dần theo sự tăng lên độ rỗng. Có thể nhận thấy rằng, kết quả đo độ rỗng phù hợp với sự suy giảm độ bền cơ học của mẫu bê tông khi tỷ lệ SBA tăng lên. Tương tự, mẫu bê tông chứa tỷ lệ SBA cao có độ rỗng tăng. Kết quả là độ hút nước tăng lên và chỉ số UPV giảm (Bảng 7).

4. KẾT LUẬN

Dựa trên kết quả thí nghiệm và các phân tích nêu trên, rút ra một số kết luận như sau:

- (1) Mẫu tro bã mía sau khi nung đến 700 °C chứa thành phần silic hoạt tính có cấu trúc vô định hình. Vật liệu SBA có thể xem là một phụ gia khoáng, sử dụng chung với xi măng.
- (2) Thay thế 10% trở lên khối lượng xi măng bởi vật liệu SBA đã xử lý nhiệt dẫn đến giảm nhanh tính công tác của hỗn hợp bê tông.
- (3) Tăng dần tỷ lệ SBA thay thế xi măng dẫn đến giảm dần cường độ chịu kéo, nén ở tất cả các thời điểm thí nghiệm. Cấp phối bê tông chứa 20% SBA có cường giảm lần lượt 24% và 18% ở 28 và 91 ngày, so với mẫu đối chứng.
- (4) Ở 7, 28, và 56 ngày tuổi, mẫu bê tông chứa 5–15% SBA có độ hút nước nhỏ hơn so với mẫu đối chứng và mẫu cấp phối bê tông chứa 10% SBA có độ hút nước nhỏ nhất. Tuy vậy, ở thời điểm 91 ngày, không có sự thay đổi lớn về độ hút nước giữa các cấp phối bê tông.
- (5) Cường độ kéo, nén của hỗn hợp bê tông chứa vật liệu SBA được xác nhận tỷ lệ nghịch với độ rỗng bên trong cấu trúc bê tông.

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] B. Suhendro, Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment, *Procedia Engineering*, 95 (2014) 305-320. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>
- [2] Y.-N. Sheen, D.-H. Le, M.N.-T. Lam, Performance of Self-compacting Concrete with Stainless Steel Slag Versus Fly Ash as Fillers: A Comparative Study, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65 (2021) 1050–1060. <https://doi.org/10.3311/PPci.17673>
- [3] H. El-Chabib, 11 - Properties of SCC with supplementary cementing materials, R. Siddique (Ed.), in *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*, Woodhead Publishing, (2020) 283-308. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817369-5.00011-8>
- [4] http://agro.gov.vn/vn/tID31345_San-luong-mia-duong-dau-nam-2022-gan-742000-tan-nhung-doi-mat-voi-dau-ra-bi-thu-hep.html, truy cập ngày 15 tháng 7 năm 2022.
- [5] FPT Securities, *Sugar Industry Updated Reports (Báo cáo cập nhật ngành đường)*, 2020.
- [6] Y. Bayapureddy, K. Muniraj, M.R.G. Mutukuru, Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in cement composites: strength, durability, and microstructural analysis, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57 (2020) 513-519. <https://doi.org/10.1007/s43207-020-00055-8>
- [7] M. Jahanzaib Khalil, M. Aslam, S. Ahmad, Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 270 (2021) 121371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121371>
- [8] A. Pereira, J.L. Akasaki, J.L.P. Melges, M.M. Tashima, L. Soriano, M.V. Borrachero, J. Monzó, J. Payá, Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag, *Ceramics International*, 41 (2015) 13012-13024. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.001>
- [9] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 3523-3531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046>
- [10] J.d.S. Andrade Neto, M.J.S. de França, N.S.d. Amorim Junior, D.V. Ribeiro, Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete, *Construction and Building Materials*, 266 (2021) 120959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120959>
- [11] A. Bahurudeen, M. Santhanam, Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash, *Cement and Concrete Composites*, 56 (2015) 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- [12] N.-u. Amin, Use of Bagasse Ash in Concrete and Its Impact on the Strength and Chloride Resistivity, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2011) 717-720. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000227](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000227)
- [13] P. Jagadesh, A. Ramachandramurthy, R. Murugesan, Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete, *Construction and Building Materials*, 176 (2018) 608-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.037> [Get rights and content](#)

- [14] ASTM “ASTM C39M-04, Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [15] ASTM “ASTM C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [16] ASTM “ASTM C597-09, Test for Pulse Velocity Through Concrete”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [17] ASTM “ASTM C642-06, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [18] N.T.T. Phương, T.Q. Hải, N.V. Hoàn, N.T. Thoa, Đ.T. Hà, N.M. Hà, Đặc tính của tro bã mía và sử dụng tro bã mía trong sản xuất gạch ceramic, Tap chí Khoa học công nghệ, 45 (2018) 19-22.
- [19] S.A. Zareei, F. Ameri, N. Bahrami, Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash, Construction and Building Materials, 184 (2018) 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153>
- [20] ASTM “ASTM C311-05, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- [21] ASTM “ASTM C109-08, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
- [22] E. Arif, M.W. Clark, N. Lake, Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production, Construction and Building Materials, 128 (2016) 287-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>
- [23] S. Nasir, H.A.A. Elhameed, N.M. Fadhil, A.M. Hashem, Effects of sugarcane bagasse ash on the properties of concrete, 171 (2018) 123-132. <https://doi.org/10.1680/jensu.15.00014>
- [24] S. Abbas, A. Sharif, A. Ahmed, W. Abbass, S. Shaukat, Prospective of sugarcane bagasse ash for controlling the alkali-silica reaction in concrete incorporating reactive aggregates, 21 (2020) 781-793. <https://doi.org/10.1002/suco.201900284>
- [25] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn, Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars, Cement and Concrete Composites, 30 (2008) 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- [26] S. Praveenkumar, G. Sankarasubramanian, Mechanical and durability properties of bagasse ash-blended high-performance concrete, SN Applied Sciences, 1 (2019) 1664. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1711-x>
- [27] Đỗ Anh Tú, Vũ Xuân Thành, Hoàng Việt Hải, Hoàng Thị Tuyết, Nguyễn Hoài Nam, Mức độ thủy hóa và sự phát triển cường độ trong bê tông cường độ cao, Tap Chí Khoa Học Giao Thông Vận Tải, 70 (2019) 85-94. <https://doi.org/10.25073/tcsj.70.2.31>
- [28] M. Shariq, J. Prasad, A. Masood, Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS, Construction and Building Materials, 40 (2013) 944-950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070>
- [29] F.C.R. Almeida, A. Sales, J.P. Moretti, P.C.D. Mendes, Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar, Construction and Building Materials, 82 (2015) 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039>
- [30] X. Chen, S. Wu, J. Zhou, Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar, Construction and Building Materials, 40 (2013) 869-874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>