

Đặc tính kỹ thuật của cốt liệu tro bay nhân tạo với đặc trưng hình học khác nhau

Bùi Phương Trinh^{1,2*}, Nguyễn Chí Hiệp^{1,2}, Trần Thành Long^{1,2}, Nguyễn Quang Trường^{1,2}, Phan Quang Hưng^{1,2}

¹ Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa Tp. HCM

² Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Khối lượng riêng
Khối lượng thể tích xốp
Độ hút nước
Độ nén đập
Cốt liệu tro bay

TÓM TẮT

Bài báo này tập trung nghiên cứu đặc tính kỹ thuật của cốt liệu tro bay nhân tạo (FAA) với hai đặc trưng hình học được chế tạo từ hai phương pháp tạo hình, gồm phương pháp vên viên liên kết nguội (V-FAA) và phương pháp gia công cơ học thủ công (Đ-FAA), để mở rộng ứng dụng FAA trong việc chế tạo bê tông. Với mục đích tái sử dụng hàm lượng lớn phế thải tro bay (FA), FAA được chế tạo từ 85 % FA và 15 % xi măng, cùng tỷ lệ nước/chất kết dính là 20 %. Sau quá trình tạo hình, FAA với cỡ hạt từ 12,5 – 20 mm được dưỡng hộ trong nước trước khi tiến hành thí nghiệm các đặc tính kỹ thuật. Bên cạnh đó, các đặc tính kỹ thuật của đá dăm (CS) cũng được xác định với mục đích so sánh. Đặc tính kỹ thuật của cốt liệu được khảo sát bao gồm khối lượng riêng, khối lượng thể tích xốp, độ hút nước và độ nén đập. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng V-FAA dạng hạt tròn trơn và Đ-FAA dạng hạt góc cạnh có các đặc tính kỹ thuật thấp hơn so với CS. Thời gian dưỡng hộ kéo dài góp phần cải thiện nhẹ đặc tính kỹ thuật của cả hai loại V-FAA và Đ-FAA. Khi so với V-FAA dạng hạt tròn trơn, Đ-FAA dạng hạt góc cạnh có các đặc tính kỹ thuật cao hơn. Mỗi quan hệ giữa các đặc tính kỹ thuật của cốt liệu cũng được thiết lập. Kết luận rằng đặc tính kỹ thuật của FAA phụ thuộc vào đặc trưng hình học được tạo ra từ các phương pháp tạo hình khác nhau.

KEYWORDS

Density
Bulk density
Water absorption
Crushing value
Fly ash aggregate

ABSTRACT

This paper focuses on investigating engineering properties of artificial fly ash aggregate (FAA) with two geometric characteristics produced through two production methods, including a cold-bonded technique (V-FAA) and a manual crushing method (Đ-FAA), to expand application of FAA in the production of concrete. With the purpose of reusing a large amount of fly ash (FA), FAA was produced from 85% FA and 15% cement, a water-to-binder ratio of 20%. After the forming process, FAA with particle sizes ranging from 12.5 – 20 mm was cured in water before testing engineering properties. In addition, the engineering properties of crushed stone (CS) were determined for comparison purposes. The engineering properties of the aggregates investigated included density, bulk density, water absorption, and crushing value. Experimental results showed that V-FAA with smooth and round particles and Đ-FAA having angular shapes had lower engineering properties than CS. The extended curing time contributed to slightly improving the engineering properties of both V-FAA and Đ-FAA. When compared with V-FAA with smooth and round particles, Đ-FAA having angular shapes exhibited enhanced engineering properties. Relationships between engineering properties of aggregates were established. Consequently, the engineering properties of FAA depend on geometrical characteristics originating from various production methods.

1. Giới thiệu

Với nhu cầu năng lượng ngày càng tăng cao, các nhà máy nhiệt điện than liên tục thải ra một lượng lớn tro bay (FA). Theo thống kê của ngành công nghiệp điện lực tại Việt Nam, tổng lượng FA phát thải từ các nhà máy nhiệt điện đến năm 2025 ước tính đạt khoảng 29,8 triệu tấn mỗi năm, chiếm từ 80% đến 85% tổng lượng tro xỉ thải ra, và dự đoán lượng phát thải tro xỉ đến năm 2030 đạt khoảng 38,5 triệu tấn [1]. Điều này cho thấy một sự gia tăng đáng báo động về lượng tro xỉ trong tương lai tại Việt Nam. Mặc dù FA đã và đang được tái sử dụng trong các lĩnh vực khác nhau như làm phụ gia khoáng hoạt tính để sản

xuất xi măng, bê tông và vật liệu xây dựng, nhưng tỷ lệ tái sử dụng FA hiện nay vẫn còn khá thấp. Lượng FA thải ra từ các nhà máy nhiệt điện được xử lý và tái sử dụng với mức khoảng 40% [2], trong khi phần lớn còn lại vẫn được lưu trữ tại các bãi chứa phế thải, dẫn đến nhiều hệ lụy nghiêm trọng đối với môi trường và gây lãng phí nguồn phế thải tiềm năng này [3, 4]. Tình trạng này phản ánh sự thiếu hụt về các giải pháp hiệu quả trong việc xử lý và tái sử dụng tro xỉ nói chung và FA nói riêng, đồng thời là một lời cảnh báo về những tác động tiêu cực đối với môi trường và cơ sở hạ tầng. Do đó, cần có những giải pháp xử lý và tái sử dụng lượng FA tồn đọng với hàm lượng lớn này.

*Liên hệ tác giả: buiphuongtrinh@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 26/05/2025, sửa xong ngày 03/06/2025, chấp nhận đăng ngày 12/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.1012>

Mặt khác, đá dăm (CS) là cốt liệu thiên nhiên thường được khai thác đưa vào ứng dụng trong việc chế tạo bê tông - một trong những vật liệu chủ yếu cho các công trình xây dựng và cơ sở hạ tầng. Cùng với quá trình đô thị hóa và sự phát triển mạnh mẽ của cơ sở hạ tầng, nhu cầu khai thác và sử dụng CS đang có xu hướng tăng cao. Điều này tạo ra nhiều tác động tiêu cực đối với môi trường và xã hội như làm cạn kiệt nguồn tài nguyên thiên nhiên hữu hạn, phá vỡ cân bằng hệ sinh thái, gây mất mỹ quan và ô nhiễm không khí cũng như nguồn nước, gây cản trở sinh hoạt và ảnh hưởng sức khỏe của cư dân xung quanh và ảnh hưởng đến động vật hoang dã, nguy cơ sạt lở đất ... [5, 6]. Chính vì thế, các giải pháp tìm kiếm và nghiên cứu phát triển các nguồn vật liệu thay thế CS cần được đề xuất và triển khai thực hiện nhằm không những bảo vệ nguồn tài nguyên thiên nhiên mà còn góp phần bảo vệ môi trường, xã hội và con người.

Dựa trên hai hiện trạng trên, cốt liệu tro bay nhân tạo (FAA) đã và đang được nghiên cứu và sản xuất để thay thế CS trong việc chế tạo bê tông [7-17]. Điền hình, Bùi và Huỳnh [12] đã nghiên cứu chế tạo FAA từ hỗn hợp FA và xi măng (XM) với tỷ lệ FA/XM khác nhau (97/3; 94/6; 91/9 và 88/12) và nhận thấy rằng khi hàm lượng XM tăng trong FAA, độ nén dập của FAA giảm; tuy nhiên, cường độ của FAA chưa đủ cao để đưa vào ứng dụng. Baykal và Döven [13] đã nghiên cứu quá trình về viên tạo hình FAA để ứng dụng trong bê tông hay các ứng dụng địa kỹ thuật và nhận thấy rằng, quá trình về viên để tạo hình FAA đảm bảo các tính chất kỹ thuật phù hợp, tùy thuộc và các đặc tính kỹ thuật của hệ nguyên vật liệu, thông số cài đặt của thiết bị (như góc nghiêng, vận tốc quay, thời gian quay và độ ẩm của nguyên vật liệu phù hợp). Harikrishnan và Ramamurthy [14] cũng đã nghiên cứu quy trình về viên này cho FAA và kết luận rằng quy trình này phụ thuộc vào cỡ hạt được tạo ra của FAA, độ ẩm và các thông số của thiết bị về viên. Ramamurthy và Harikrishnan [15] đã kết luận rằng các tính chất kỹ thuật của FAA phụ thuộc đáng kể vào loại chất kết dính sử dụng (như XM Portland, bentonite dạng natri và bột nhôm). Shanmugan và cộng sự [16] cũng đã nghiên cứu tạo hình FAA với tỷ lệ nước/xi măng là 0,30 trong máy về viên, tiến hành dưỡng hộ 1 ngày trong không khí và sau đó ngâm trong nước đến ngày tuổi thí nghiệm các đặc trưng kỹ thuật. Từ kết quả thực nghiệm, Shanmugan và cộng sự [16] nhận thấy rằng FAA có các tính chất kỹ thuật thấp, cụ thể: khối lượng riêng đạt 2,10 g/cm³, tức thấp hơn 22,5 %, và độ hút nước cao đạt 12,10 %, tức cao hơn gấp 14 lần so với cốt liệu thô thông thường. Điều này đã dẫn đến các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông sử dụng FAA thấp hơn so với bê tông sử dụng cốt liệu thô thông thường. Tuy nhiên, Shanmugan và cộng sự [16] đã đề xuất việc sử dụng FAA thay thế một phần cốt liệu thông thường để tạo ra loại bê tông bền vững và thân thiện với môi trường. Bùi và cộng sự [17] đã đánh giá toàn diện về đặc tính kỹ thuật, hiệu quả kinh tế và tác động môi trường của FAA với các tỷ lệ FA/XM lần lượt là 85/15, 50/50, 15/85 và 0/100, được chế tạo từ phương pháp tạo hình về viên liên kết nguội. Các tác giả đã kết luận rằng FAA được chế tạo với tỷ lệ FA/XM = 85/15 là cốt liệu vừa có đặc tính kỹ thuật phù hợp, giá thành sản xuất thấp và thân thiện với môi trường. Tóm lại, FAA được sản xuất từ quá trình về viên nên có hình dạng tròn trơn

và nhẵn, cấu trúc rỗng cao và đặc tính kỹ thuật thấp hơn so với cốt liệu thiên nhiên [18-20]. Chính vì thế, bê tông sử dụng FAA có các đặc tính kỹ thuật thấp hơn so với bê tông truyền thống sử dụng CS [7-11]. Tuy nhiên, nghiên cứu về đặc tính kỹ thuật của FAA có hình dạng góc cạnh từ phương pháp tạo hình khác cũng như ảnh hưởng của loại FAA đến đặc tính kỹ thuật của bê tông nói riêng và vật liệu xây dựng nói chung vẫn còn rất hạn chế.

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này chủ yếu tập trung khảo sát đặc tính kỹ thuật của FAA với hai đặc trưng hình học khác nhau được chế tạo từ hai phương pháp tạo hình, gồm phương pháp về viên liên kết nguội và phương pháp gia công cơ học thủ công, để mở rộng ứng dụng FAA trong việc chế tạo bê tông nói riêng và vật liệu xây dựng nói chung. Điều này góp phần giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường từ nguồn phế thải FA đồng thời sản xuất FAA - nguồn cốt liệu tiềm năng thay thế nguồn vật liệu thiên nhiên (tức đá dăm) nhằm hướng tới bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và môi trường.

2. Thực nghiệm

2.1. Hệ nguyên vật liệu

Tro bay từ nhà máy nhiệt điện Vedan được sử dụng để chế tạo FAA và thỏa mãn theo TCVN 10302 : 2014 [21]. Trong khi, XM Portland PC40 của nhà máy Vicem Hà Tiên được sử dụng để làm chất kết dính cho việc chế tạo FAA và thỏa mãn theo TCVN 2682 : 2020 [22]. Các chỉ tiêu kỹ thuật bao gồm tính chất cơ lý và thành phần hóa của FA và XM được trình bày ở Bảng 1. Bên cạnh đó, nước (N) được sử dụng để chế tạo FAA là nguồn nước thủy cục từ phòng thí nghiệm, không có váng dầu mỡ, không màu, và không chứa tạp chất, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 4506 : 2012 [23]. Ngoài ra, CS có nguồn gốc từ đá granit cũng được sử dụng với mục đích so sánh.

Bảng 1. Các chỉ tiêu kỹ thuật của FA và XM.

Chỉ tiêu kỹ thuật	Đơn vị	FA	XM
Khối lượng riêng	g/cm ³	1,98	3,10
Lượng nước tiêu chuẩn	%	-	30
Thời gian ninh kết			
- Bắt đầu	phút	-	140
- Kết thúc	phút	-	170
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi	MPa	-	60,4
Chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày tuổi	%	98,92	-
Thành phần hóa	%	51,20	27,13
SiO ₂	%	18,58	4,97
Al ₂ O ₃	%	17,01	0
Fe ₂ O ₃	%	9,22	59,71
CaO	%	0,39	3
SO ₃	%	1,60	0,34
Na ₂ O & K ₂ O	%	2,63	2,0
Mất khi nung			

- : không thí nghiệm

2.2. Thiết kế cấp phối FAA

Để tái sử dụng hàm lượng lớn FA từ nhà máy nhiệt điện, đồng thời dựa trên nghiên cứu trước [17] và thử nghiệm tại phòng thí nghiệm, nghiên cứu này tập trung sử dụng FA với 85 % theo khối lượng chất kết dính (CKD) kết hợp với XM chiếm 15 % theo khối lượng CKD. Tỷ lệ N/CKD cố định và bằng 20 % để đáp ứng nhu cầu nước cần thiết cho quá trình tạo hình FAA tại phòng thí nghiệm. Thành phần cấp phối FAA được thiết kế dựa trên tổng thể tích đặc tuyệt đối của hệ nguyên vật liệu và được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2. Cấp phối cho 1 m³ FAA.

Thành phần	Đơn vị: kg/m ³		
	FA	XM	N
Khối lượng	1093	193	386

FA: tro bay ; XM: xi măng ; N: nước

2.3. Quy trình chế tạo

Để đánh giá đặc tính kỹ thuật của FAA với các đặc trưng hình học khác nhau, nghiên cứu này tiến hành sản xuất chế tạo FAA theo hai phương pháp tạo hình khác nhau, gồm phương pháp 1 là phương pháp vè viên kết nguội và phương pháp 2 là phương pháp gia công cơ học thủ công và bảo dưỡng trong nước. Đối với phương pháp 1, quy trình chế tạo được thực hiện bao gồm các bước sau: (1) cân khối lượng FA và XM theo Bảng 2; (2) trộn đồng nhất hỗn hợp khô bao gồm FA và XM; (3) điều chỉnh máy vè viên với góc nghiêng 45 ° và tốc độ quay 60 ± 10 vòng/phút và khởi động máy; (4) cho hỗn hợp khô vào máy vè viên đang quay; (5) phun sương nước đã được định lượng theo Bảng 2 để tạo sự kết dính hỗn hợp với nhau và hình thành các viên FAA (V-FAA); (6) cho V-FAA ra khỏi máy vè viên và rây để thu được V-FAA với cỡ hạt từ 12,5 – 20 mm; (7) dưỡng hộ V-FAA một ngày trong không khí ở nhiệt độ phòng 20 °C và độ ẩm tương đối 70 % và sau đó dưỡng hộ trong nước đến ngày tuổi thí nghiệm (7 và 28 ngày tuổi). Quy trình này được tham khảo từ nghiên cứu trước [17] kết hợp với thử nghiệm tại phòng thí nghiệm để tạo hình V-FAA. Hình 1 (a) thể hiện V-FAA sau quá trình vè viên.



(a) V-FAA sau quá trình vè viên



(b) Đ-FAA sau quá trình gia công

Hình 1. Hai loại FAA theo hai phương pháp tạo hình khác nhau.

Đối với phương pháp 2, quy trình chế tạo được thực hiện bao gồm các bước sau: (1) cân khối lượng FA và XM theo Bảng 2; (2) trộn đồng

nhất hỗn hợp khô bao gồm FA và XM bằng máy trộn trong 30 giây; (3) đổ nước đã được định lượng theo Bảng 2 vào máy trộn và trộn tiếp 60 giây; (4) đổ hỗn hợp vào các khuôn; (5) dưỡng hộ các mẫu FAA trong khuôn trong 20 ± 4 giờ ở nhiệt độ phòng 20 °C và độ ẩm tương đối 70 %; (6) tháo khuôn và ngâm mẫu trong nước đến 7 ngày tuổi; (7) đập nhỏ FAA bằng phương pháp gia công cơ học thủ công và rây để thu được Đ-FAA với cỡ hạt từ 12,5 – 20 mm (Hình 1 (b)) và sau đó, tiến hành thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật của Đ-FAA ở 7 ngày tuổi; (8) phần còn lại của Đ-FAA tiếp tục được ngâm trong nước đến 28 ngày tuổi để tiến hành thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật của Đ-FAA ở 28 ngày tuổi.

2.4. Quy trình thí nghiệm

Các đặc tính kỹ thuật của hai loại FAA (V-FAA và Đ-FAA) ở 7 và 28 ngày tuổi cùng CS được khảo sát bao gồm khối lượng riêng, khối lượng thể tích xốp, độ hút nước và độ nén đập. Mỗi đặc tính kỹ thuật được lấy giá trị trung bình của hai lần thí nghiệm tương ứng mỗi loại cốt liệu ở từng độ tuổi.

Theo TCVN 7572-4 : 2006 [24], quy trình thí nghiệm khối lượng riêng của mỗi loại cốt liệu bao gồm các bước sau: (1) cân lượng cốt liệu ở trạng thái bão hòa nước khô bề mặt (SSD) và ghi lại khối lượng (m_1); (2) cho mẫu cốt liệu vào bình đong và sau đó, thêm nước vào, lắc và xoay nhẹ bình để loại bỏ hoàn toàn bọt khí bên trong; (3) đổ đầy nước vào bình, đặt tấm kính lên miệng bình sao cho không còn bọt khí giữa nước và tấm kính; (4) lau khô mặt ngoài bình và cân khối lượng bình chứa mẫu, nước và tấm kính để ghi nhận giá trị (m_2); (5) đổ mẫu và nước ra khỏi bình và sấy mẫu đến khối lượng không đổi và ghi nhận giá trị khối lượng (m_4); (6) rửa sạch bình và tiếp tục đổ đầy nước vào bình; (7) đặt tấm kính lên miệng bình và cân khối lượng bình chứa nước và tấm kính để ghi nhận giá trị khối lượng (m_3). Khối lượng riêng của mỗi loại cốt liệu được tính theo công thức (1).

$$\gamma_a = \gamma_n \times \frac{m_4}{m_4 - (m_2 - m_3)} \quad (1)$$

Trong đó: γ_a là khối lượng riêng của cốt liệu (g/cm³); γ_n là khối lượng riêng của nước (g/cm³); m_2 là khối lượng của bình chứa cốt liệu, nước và tấm kính (g); m_3 là khối lượng của bình chứa nước và tấm kính (g); m_4 là khối lượng của mẫu ở trạng thái khô hoàn toàn (OD) (g).

Theo TCVN 7572-6 : 2006 [25], quy trình thí nghiệm khối lượng thể tích xốp của mỗi loại cốt liệu bao gồm các bước sau: (1) đem cân khối lượng của thùng đong có thể tích 5 L và ghi nhận khối lượng (m_{td}); (2) đổ mẫu cốt liệu ở trạng thái OD vào thùng đong với độ cao rơi cách miệng thùng là 10 cm; (3) dùng thước gạt bằng mặt thùng; (4) đem cân khối lượng của thùng đong chứa cốt liệu và ghi nhận khối lượng (m_{td+cl}). Khối lượng thể tích xốp của mỗi loại cốt liệu được tính theo công thức (2).

$$\gamma_o = \frac{(m_{td+cl} - m_{td})}{V} \quad (2)$$

Trong đó: γ_o là khối lượng thể tích xốp của cốt liệu (kg/m³); m_{td} là khối lượng của thùng đong có thể tích 5 L (kg); m_{td+cl} là khối lượng của thùng đong chứa cốt liệu (kg); V là thể tích của thùng đong (= 5 L = 0,005 m³).

Trong nghiên cứu này, độ hút nước của cốt liệu được định nghĩa là khả năng hút và giữ nước của cốt liệu sau 24 giờ ngâm trong nước. Do đó, quy trình thí nghiệm độ hút nước của mỗi loại cốt liệu bao gồm các bước sau: (1) cân khối lượng của mẫu cốt liệu ở trạng thái OD và ghi nhận giá trị (m_o); (2) ngâm mẫu cốt liệu trong nước trong 24 giờ; (3) lấy mẫu và lau khô bề mặt và sau đó, đem cân khối lượng để ghi nhận giá trị (m_{24}). Độ hút nước của cốt liệu được tính theo công thức (3).

$$H_p = \frac{(m_{24} - m_o)}{m_o} \times 100 \% \quad (3)$$

Trong đó: H_p là độ hút nước của cốt liệu (%); m_o là khối lượng của mẫu cốt liệu ở trạng thái OD (g); m_{24} là khối lượng của mẫu cốt liệu sau khi ngâm trong nước 24 giờ (g).

Độ nén đập của mỗi loại cốt liệu được khảo sát ở hai trạng thái, bao gồm trạng thái OD và SSD. Theo TCVN 7572-11 : 2006 [26], quy trình thí nghiệm độ nén đập của mỗi loại cốt liệu bao gồm các bước sau: (1) đổ mẫu cốt liệu ở mỗi trạng thái (OD hay SSD) vào xi lanh với đường kính 75 mm với độ cao rơi 50 mm; (2) cân khối lượng của mẫu cốt liệu và ghi nhận giá trị (m_{cl}); (3) làm phẳng mặt rồi đặt pistol sắt lên xi lanh; (4) đặt xi lanh chứa mẫu cốt liệu vào máy nén; (4) khởi động máy nén và tăng lực nén với tốc độ từ 1 kN/s đến 2 kN/s và dừng ở tải trọng 50 kN; (5) đổ mẫu ra khỏi xi lanh và sàng qua sàng 2,5 mm và sau đó, cân khối lượng mẫu cốt liệu sót trên sàng rồi ghi nhận giá trị (m_s). Độ nén đập của cốt liệu ở mỗi trạng thái (OD hay SSD) được tính theo công thức (4).

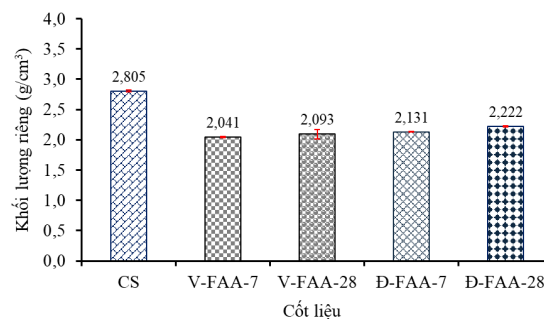
$$CRV = \frac{(m_{cl} - m_s)}{m_{cl}} \times 100 \% \quad (4)$$

Trong đó: CRV là độ nén đập của cốt liệu (%); m_{cl} là khối lượng của mẫu cốt liệu ở mỗi trạng thái (OD hay SSD) được bỏ vào trong xi lanh (g); m_s là khối lượng của mẫu cốt liệu còn sót lại trên sàng 2,5 mm sau khi sàng (g).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Khối lượng riêng

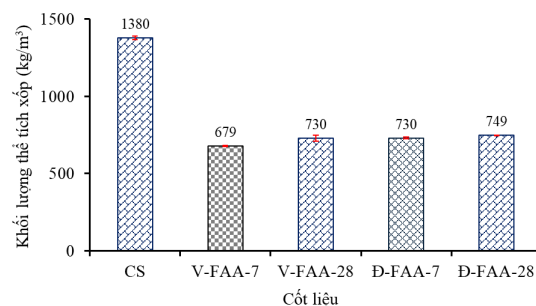
Hình 2 thể hiện khối lượng riêng của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi. Khối lượng riêng của CS là 2,805 g/cm³; trong khi, khối lượng riêng của cả hai loại FAA nằm trong khoảng từ 2,041 – 2,222 g/cm³, tức thấp hơn từ 20,78 – 27,24 % so với CS. Điều này chứng tỏ rằng FAA dù chế tạo từ các phương pháp khác nhau vẫn có giá trị khối lượng riêng thấp hơn so với CS, dẫn đến từ cấu trúc rỗng được hình thành trong quá trình tạo hình [19, 27]. Đối với FAA, Đ-FAA có khối lượng riêng cao hơn 4,41 % ở 7 ngày tuổi và 6,16 % ở 28 ngày tuổi khi so với V-FAA, chứng tỏ rằng phương pháp 2 góp phần cải thiện nhẹ khối lượng riêng của Đ-FAA, không phụ thuộc vào thời gian dưỡng hộ. Khi so với FAA ở 7 ngày tuổi, khối lượng riêng của V-FAA và Đ-FAA ở 28 ngày tuổi cao hơn lần lượt 2,55 % và 4,27 %, chứng tỏ rằng thời gian dưỡng hộ góp phần tăng nhẹ khối lượng riêng của FAA, dẫn đến từ quá trình hydrat hóa của xi măng và phản ứng pozzolanic của FA tiếp diễn để tạo ra các sản phẩm hydrat hóa lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc trong FAA [28]. Hiệu quả cải thiện khối lượng riêng của FAA do thời gian dưỡng hộ nước cũng được nhận định bởi Bùi và cộng sự [17].



Hình 2. Khối lượng riêng của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi.

3.2. Khối lượng thể tích xốp

Hình 3 thể hiện khối lượng thể tích xốp của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi. Khối lượng thể tích xốp của CS là 1380 kg/m³; trong khi, khối lượng thể tích xốp của cả hai loại FAA nằm trong khoảng từ 679 – 749 kg/m³, tức thấp hơn từ 45,72 – 50,80 % so với CS. Xu hướng này tương tự với xu hướng của khối lượng riêng (Hình 2). Nguyên nhân là do FAA được tạo hình nhân tạo từ các phương pháp khác nhau nên cấu trúc rỗng hơn so với CS có nguồn gốc đặc chắc từ thiên nhiên.



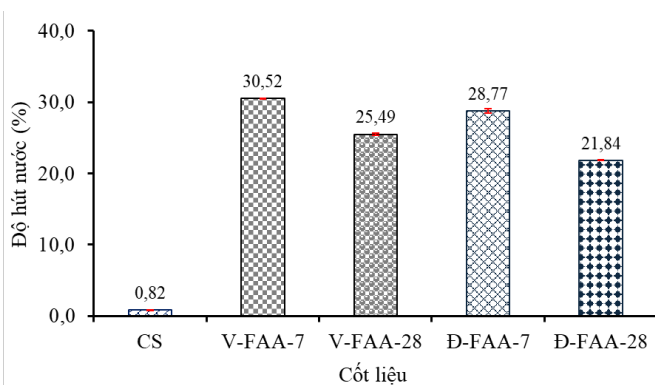
Hình 3. Khối lượng thể tích xốp của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi.

Đối với FAA, Đ-FAA có khối lượng thể tích xốp cao hơn 7,51 % ở 7 ngày tuổi và 2,60 % ở 28 ngày tuổi khi so với V-FAA, chứng tỏ rằng phương pháp 2 góp phần cải thiện nhẹ khối lượng thể tích xốp của FAA. Khi so với FAA ở 7 ngày tuổi, khối lượng thể tích xốp của V-FAA và Đ-FAA ở 28 ngày tuổi cao hơn lần lượt 7,51 % và 2,60 %, chứng tỏ rằng thời gian dưỡng hộ góp phần tăng nhẹ khối lượng thể tích xốp của V-FAA và Đ-FAA. Xu hướng này tương tự với kết quả của khối lượng riêng của FAA ở 28 ngày tuổi cao hơn so với 7 ngày tuổi (Hình 2), dẫn đến từ quá trình hydrat hóa của xi măng và phản ứng pozzolanic của FA tiếp diễn để tạo ra các sản phẩm hydrat hóa lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc trong FAA [28].

3.3. Độ hút nước

Hình 4 thể hiện độ hút nước của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi. Độ hút nước của CS rất thấp và bằng 0,82 %; trong khi, độ

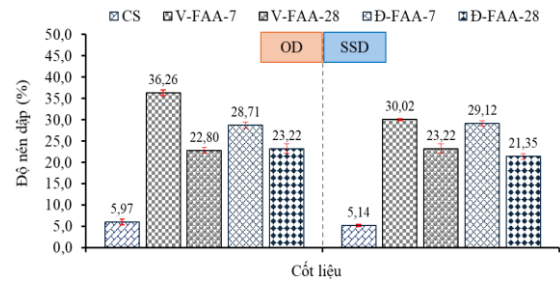
hút nước của cả hai loại FAA rất cao và nằm trong khoảng từ 21,84 – 30,52 %, tức cao hơn gấp 26,63 – 37,22 lần so với CS. Nguyên nhân là do cả V-FAA và Đ-FAA có nhiều lỗ rỗng hờ được hình thành trong quá trình tạo hình hơn so với CS có nguồn gốc thiên nhiên [19, 27]. Đối với FAA, Đ-FAA có độ hút nước thấp hơn 5,73 % ở 7 ngày tuổi và 14,32 % ở 28 ngày tuổi khi so với V-FAA, chứng tỏ rằng phương pháp 2 góp phần làm giảm độ hút nước của Đ-FAA. Khi so với FAA ở 7 ngày tuổi, độ hút nước của V-FAA và Đ-FAA ở 28 ngày tuổi thấp hơn lần lượt 16,48 % và 24,09 %, chứng tỏ rằng thời gian dưỡng hộ góp phần làm giảm khả năng hút nước của FAA, dẫn đến từ các sản phẩm hydrat hóa lấp đầy lỗ rỗng hờ và tăng độ đặc chắc trong FAA theo thời gian [28]. Hiệu quả cải thiện độ hút nước của FAA do thời gian dưỡng hộ nước cũng được nhận định bởi Bùi và cộng sự [17].



Hình 4. Độ hút nước của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi.

3.4. Độ nén dập

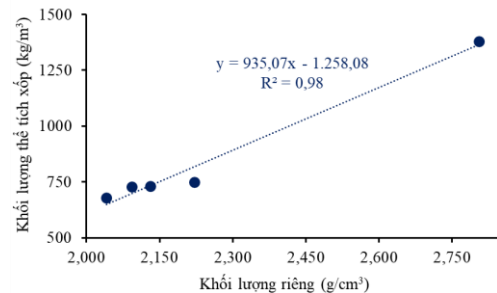
Hình 5 thể hiện độ nén dập của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi. Độ nén dập của CS nằm trong khoảng 5,14 – 5,97 %; trong khi đó, độ nén dập ở trạng thái OD và SSD của cả hai loại FAA nằm trong khoảng 21,35 – 36,26 %, tức cao gấp 4,15 – 6,07 lần so với CS. Điều này chứng tỏ rằng FAA dù chế tạo từ các phương pháp khác nhau vẫn yếu hơn so với CS, dẫn đến từ cấu trúc rỗng được hình thành trong quá trình tạo hình [19, 27]. Xu hướng này cũng được quan sát trong nghiên cứu của Bùi và cộng sự [17]. Đối với FAA, Đ-FAA có độ nén dập ở trạng thái OD thấp hơn 20,82 % ở 7 ngày tuổi và xấp xỉ ở 28 ngày tuổi khi so với V-FAA; Đ-FAA có độ nén dập ở trạng thái SSD thấp hơn 2,99 % ở 7 ngày tuổi và 8,05 % ở 28 ngày tuổi khi so với V-FAA; điều này chứng tỏ rằng phương pháp 2 làm giảm độ nén dập của Đ-FAA. Khi so với FAA ở 7 ngày tuổi, độ nén dập của V-FAA và Đ-FAA ở 28 ngày tuổi thấp hơn lần lượt 19,12 – 37,12 % và 22,65 – 26,68 % ở cả hai trạng thái OD và SSD, chứng tỏ rằng thời gian dưỡng hộ góp phần làm giảm độ nén dập của FAA. Nguyên nhân là do sự hình thành của các sản phẩm từ quá trình hydrat hóa của xi măng và phản ứng pozzolanic của FA đã lấp đầy lỗ rỗng và tăng độ đặc chắc trong FAA [28]. Hiệu quả cải thiện độ nén dập của FAA do thời gian dưỡng hộ nước cũng được nhận định bởi Bùi và cộng sự [17].



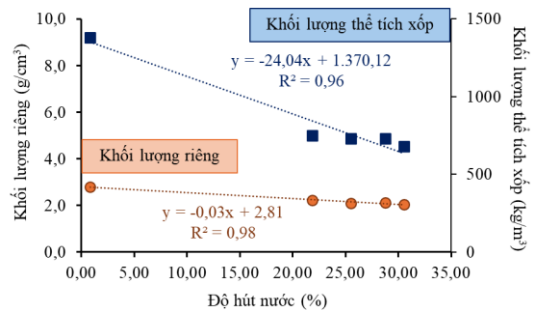
Hình 5. Độ nén dập của CS, V-FAA và Đ-FAA ở 7 và 28 ngày tuổi dưới hai trạng thái OD và SSD.

3.5. Mối quan hệ giữa các đặc tính kỹ thuật

Hình 6 thể hiện mối quan hệ thuận giữa khối lượng riêng và khối lượng thể tích xốp với R^2 rất cao ($= 0,98$), chứng tỏ rằng khi khối lượng riêng của cốt liệu tăng, khối lượng thể tích xốp tăng. Dựa trên mối quan hệ này, khối lượng thể tích xốp của cốt liệu có thể được dự đoán từ khối lượng riêng, không phụ thuộc vào loại cốt liệu và phương pháp chế tạo. Bên cạnh đó, mối quan hệ giữa độ hút nước và khối lượng riêng và mối quan hệ giữa độ hút nước và khối lượng thể tích xốp được thể hiện ở Hình 7. Cả hai mối quan hệ này là mối quan hệ nghịch với R^2 rất cao ($R^2 = 0,98$ trong trường hợp mối quan hệ giữa độ hút nước và khối lượng riêng và $R^2 = 0,96$ trong trường hợp mối quan hệ giữa độ hút nước và khối lượng thể tích xốp), chứng tỏ rằng cốt liệu có độ hút nước cao, tức là có khối lượng riêng và khối lượng thể tích xốp thấp và ngược lại, không phụ thuộc vào loại cốt liệu và phương pháp chế tạo.

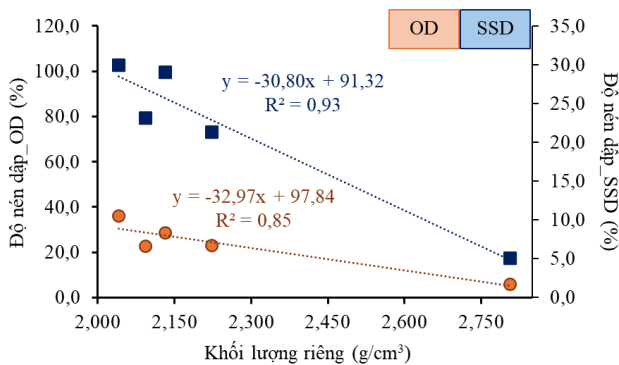


Hình 6. Mối quan hệ giữa khối lượng riêng và khối lượng thể tích xốp.

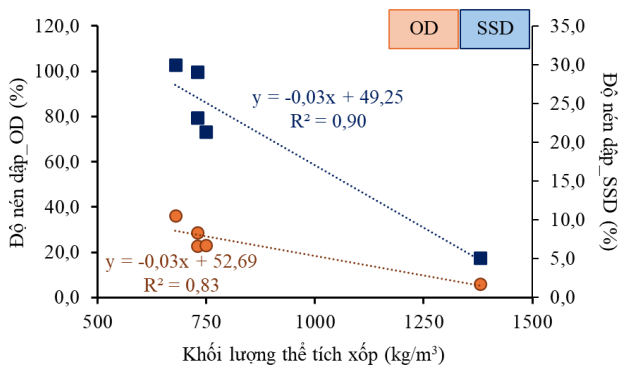


Hình 7. Mối quan hệ giữa độ hút nước và khối lượng riêng và mối quan hệ giữa độ hút nước và khối lượng thể tích xốp.

Hình 8 thể hiện mối quan hệ giữa khối lượng riêng với độ nén đập ở trạng thái OD và mối quan hệ giữa khối lượng riêng với độ nén đập ở trạng thái SSD. Cả hai mối quan hệ này là mối quan hệ nghịch với R^2 tương đối cao ($R^2 = 0,85$ trong trường hợp mối quan hệ giữa khối lượng riêng với độ nén đập ở trạng thái OD và $R^2 = 0,93$ trong trường hợp mối quan hệ giữa khối lượng riêng với độ nén đập ở trạng thái SSD), chứng tỏ rằng cốt liệu với khối lượng riêng cao sẽ có độ nén đập ở cả hai trạng thái thấp và ngược lại, không phụ thuộc vào loại cốt liệu và phương pháp chế tạo. Trong khi đó, Hình 9 thể hiện mối quan hệ giữa khối lượng thể tích xốp với độ nén đập ở trạng thái OD và mối quan hệ giữa khối lượng thể tích xốp với độ nén đập ở trạng thái SSD. Cả hai mối quan hệ này là mối quan hệ nghịch với $R^2 = 0,83$ trong trường hợp mối quan hệ giữa khối lượng thể tích xốp với độ nén đập ở trạng thái OD và $R^2 = 0,90$ trong trường hợp mối quan hệ giữa khối lượng thể tích xốp với độ nén đập ở trạng thái SSD, chứng tỏ rằng cốt liệu với khối lượng thể tích xốp cao sẽ có độ nén đập ở cả hai trạng thái thấp và ngược lại, không phụ thuộc vào loại cốt liệu và phương pháp chế tạo.



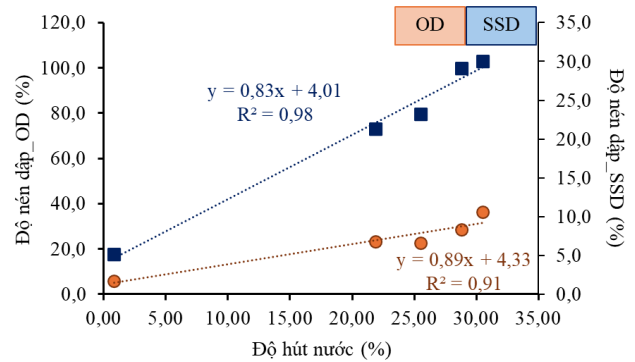
Hình 8. Mối quan hệ giữa khối lượng riêng với độ nén đập ở trạng thái OD và mối quan hệ giữa khối lượng riêng với độ nén đập ở trạng thái SSD.



Hình 9. Mối quan hệ giữa khối lượng thể tích xốp với độ nén đập ở trạng thái OD và mối quan hệ giữa khối lượng thể tích xốp với độ nén đập ở trạng thái SSD.

Hình 10 thể hiện mối quan hệ giữa độ hút nước với độ nén đập ở trạng thái OD và mối quan hệ giữa độ hút nước với độ nén đập ở trạng

thái SSD. Cả hai mối quan hệ này là mối quan hệ thuận với R^2 cao ($R^2 = 0,91$ trong trường hợp mối quan hệ giữa độ hút nước với độ nén đập ở trạng thái OD và $R^2 = 0,98$ trong trường hợp mối quan hệ giữa độ hút nước với độ nén đập ở trạng thái SSD), chứng tỏ rằng cốt liệu có độ hút nước cao sẽ có độ nén đập ở cả hai trạng thái cao và ngược lại.



Hình 10. Mối quan hệ giữa độ hút nước với độ nén đập ở trạng thái OD và mối quan hệ giữa độ hút nước với độ nén đập ở trạng thái SSD.

4. Kết luận

Dựa trên kết quả thực nghiệm đánh giá đặc tính kỹ thuật của V-FAA và Đ-FAA với cỡ hạt từ 12,5 – 20 mm từ hai quá trình tạo hình khác nhau, bài báo này đưa ra một vài kết luận chính sau:

(1) Khi so với CS, khối lượng riêng của cả hai loại FAA nằm trong khoảng từ 2,041 – 2,222 g/cm³, tức thấp hơn từ 20,78 – 27,24 %; khối lượng thể tích xốp nằm trong khoảng từ 679 – 749 kg/m³, tức thấp hơn từ 45,72 – 50,80 %; độ hút nước của cả hai loại FAA rất cao và nằm trong khoảng từ 21,84 – 30,52 %, tức cao hơn gấp 26,63 – 37,22 lần; độ nén đập ở trạng thái OD và SSD của cả hai loại FAA nằm trong khoảng từ 21,35 – 36,26 %, tức cao gấp 4,15 – 6,07 lần, không phụ thuộc vào hình dáng của FAA.

(2) Khi so với V-FAA có dạng hạt tròn trơn, Đ-FAA với dạng hạt góc cạnh có khối lượng riêng cao hơn 4,41 – 6,16 %, khối lượng thể tích xốp cao hơn 2,60 – 7,51 %, độ hút nước thấp hơn 5,73 – 14,32 % và độ nén đập thấp hơn 2,99 – 20,82 %, không phụ thuộc vào độ tuổi của FAA.

(3) Khi so với FAA ở 7 ngày tuổi, khối lượng riêng của FAA ở 28 ngày tuổi cao hơn lần lượt 2,55 – 4,27 %, khối lượng thể tích xốp ở 28 ngày tuổi cao hơn 2,60 – 7,51 %, độ hút nước của FAA ở 28 ngày tuổi thấp hơn 16,48 – 24,09 % và độ nén đập ở 28 ngày tuổi thấp hơn 19,12 – 37,12 %. Điều này chứng tỏ rằng thời gian dưỡng hộ góp phần cải thiện đặc tính kỹ thuật của FAA, không phụ thuộc vào hình dáng của FAA.

(4) Các đặc tính kỹ thuật của cốt liệu có mối quan hệ phụ thuộc với nhau, chứng tỏ rằng cốt liệu có khối lượng riêng và khối lượng thể tích cao, tức có độ hút nước và độ nén đập thấp, và ngược lại, không phụ thuộc vào loại và hình dáng của cốt liệu.

Nhìn chung, FAA với các đặc trưng hình học khác nhau thông qua hai quá trình chế tạo vẫn có đặc tính kỹ thuật thấp hơn so với CS.

Đ-FAA với hình dạng góc cạnh có đặc tính kỹ thuật tốt hơn so với V-FAA có hình dạng tròn và trơn. Các nghiên cứu sâu hơn về ảnh hưởng của cỡ hạt FAA với các phương pháp tạo hình khác nhau đến đặc tính kỹ thuật và cấu trúc của cốt liệu cũng như ứng dụng của các loại FAA này vào trong bê tông cần được triển khai tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số: B2024-20-11. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Quyết định 428/QĐ-TTg, “Phê duyệt điều chỉnh phát triển điện lực quốc gia giai đoạn 2011 - 2020 có xét đến năm 2030,” 2016.
- [2]. A.Q. Ngô, “Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến một số tính chất kỹ thuật của bê tông ứng dụng cho các công trình thủy lợi,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, số 78, 1–7, 2023.
- [3]. M. Wang, D. Chen, H. Wang, W. Gao, “A review on fly ash high-value synthesis utilization and its prospect,” *Green Energy and Resources*, vol. 2, 100062, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2024.100062>.
- [4]. Yliniemi, Paiva, Ferreira, Tiainen, Illikainen, “Development and incorporation of lightweight waste-based geopolymers aggregates in mortar and concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 131, 784–792, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.017>.
- [5]. P. Ren, T.C. Ling, K.H. Mo, “Recent advances in artificial aggregate production,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 291, 125215, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125215>.
- [6]. M. Xu, L. Mo, “Towards sustainable artificial aggregate production using industrial waste and CO₂: a comprehensive review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 97, 110823, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110823>.
- [7]. M. Gesoglu, T. Ozturan, E. Güneyisi, “Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, 598–605, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.04.002>.
- [8]. O. Kayali, “Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, 2393–2399, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.001>.
- [9]. G. Joseph, K. Ramamurthy, “Influence of fly ash on strength and sorption characteristics of cold-bonded fly ash aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, 1862–1870, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.018>.
- [10]. N.U. Kockal, T. Ozturan, “Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 179, 954–965, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.098>.
- [11]. N.U. Kockal, T. Ozturan, “Optimization of properties of fly ash aggregates for high-strength lightweight concrete production,” *Materials and Design*, vol. 32, 3586–3593, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.028>.
- [12]. L.A.T. Bùi, P.N. Huỳnh, “Chế tạo cốt liệu nhẹ từ tro bay cho bê tông xi măng,” *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, số 4, 26–32, 2021.
- [13]. G. Baykal, A.G. Döven, “Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results,” *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 30, 59–77, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00042-2).
- [14]. K.I. Harikrishnan, K. Ramamurthy, “Influence of pelletization process on the properties of fly ash aggregates,” *Waste Management*, vol. 26, 846–852, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.10.012>.
- [15]. K. Ramamurthy, K.I. Harikrishnan, “Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, 33–38, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.06.005>.
- [16]. S. Shanmugan, V. Deepak, J. Nagaraj, D. Jangir, S. Viyagula Jegan, S. Palani, “Enhancing the use of coal-fly ash in coarse aggregates concrete,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 30, 174–182, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.734.
- [17]. P.T. Bui, T.L. Tran, Q.T. Nguyen, “A comprehensive performance assessment of cold-bonded aggregate with various Class-F fly ash and Portland cement amounts,” *Construction and Building Materials*, vol. 473, 140936, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140936>.
- [18]. S. Geetha, K. Ramamurthy, “Environmental friendly technology of cold-bonded bottom ash aggregate manufacture through chemical activation,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, 1563–1569, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.006>.
- [19]. X. Peng, Y. Zhou, R. Jia, W. Wang, Y. Wu, “Preparation of non-sintered lightweight aggregates from dredged sediments and modification of their properties,” *Construction and Building Materials*, vol. 132, 9–20, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.088>.
- [20]. B. Ghosh, “Autoclaved fly-ash pellets as replacement of coarse aggregate in concrete mixture,” *Indian Journal of Civil Engineering*, vol. 1, 36–44, 2018. 10.17010/ijce/2018/v1i2/140576.
- [21]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 10302 : 2014 Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng,” 51 trang, 2014.
- [22]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 2682 : 2020 Xi măng Poóc Lăng - Yêu cầu kỹ thuật,” 17 trang, 2020.
- [23]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 4506:2012 Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật,” 17 trang, 2012.
- [24]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 7572-4 : 2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 4: Xác định khối lượng riêng, khối lượng thể tích và độ hút nước,” 17 trang, 2006.
- [25]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 7572-6 : 2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 6: Xác định khối lượng thể tích xốp và độ hồng,” 17 trang, 2006.
- [26]. Bộ Khoa học và công nghệ, “TCVN 7572-11 : 2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 11: Xác định độ nén đập và hệ số hóa mềm của cốt liệu lớn,” 17 trang, 2006.
- [27]. A.R. Shrestha, J. Xia, L. Di Sarno, C.S. Chinn, “Feasibility study of utilizing autoclaved aerated concrete (AAC) waste for the production of cold bonded lightweight artificial aggregate using high volume fly ash (HVFA) binders,” *Construction and Building Materials*, vol. 449, 138414, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138414>.
- [28]. R. Manikandan, K. Ramamurthy, “Effect of curing method on characteristics of cold bonded fly ash aggregates,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, 848–853, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.006>.