ỨNG DỤNG BỀN VỮNG BÙN SILICA THẢI LÀM CHẤT THAY THẾ CỐT LIỆU MỊN TRONG BÊ TÔNG HIỆU NĂNG CAO

SUSTAINABLE APPLICATION OF WASTE SILICA SLUDGE AS A FINE AGGREGATE REPLACEMENT IN HIGH-PERFORMANCE CONCRETE

SVTH: [1]Nguyễn Cẩm Tú, [2]Đặng Tuấn, [3]Nguyễn Nhật Quyến
[1]Lớp 24XD2; Khoa Kỹ thuật Xây dựng; email: 241506112246@sv.ute.udn.vn;
[2]Lớp 23XD2; Khoa Kỹ thuật Xây dựng; email: 23115061122238@sv.ute.udn.vn;
[3]Lớp 22XD2; Khoa Kỹ thuật Xây dựng; email: 22115061122242@sv.ute.udn.vn;
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng,
GVHD: Th.S Ngô Thanh Vinh
Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng.

Tóm tắt: Nghiên cứu này điều tra ảnh hưởng của bùn silica thải (WSS) đến các tính chất cơ học của bê tông hiệu năng cao (HPC). Các hỗn hợp HPC được nghiên cứu với tỷ lệ nước/chất rắn (W/S) không đổi là 0,35 được sản xuất dựa trên hệ thống hoạt hóa kiềm sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS) và bột gạch đỏ thải (WRB). WSS được sử dụng để thay thế một phần cát sông tự nhiên ở các mức 0, 10, 20, 30 và 40% theo trọng lượng (ký hiệu là S0–S40) để đánh giá ảnh hưởng của nó đến các tính chất sau khi đông cứng. Các mẫu HPC được kiểm tra cường độ nén, cường độ uốn, vận tốc xung siêu âm (UPV) và điện trở suất bề mặt (ESR). Kết quả cho thấy việc tái sử dụng WSS ở mức thay thế 10-20% đã cải thiện hiệu suất cơ học của HPC, trong khi mức thay thế cao hơn dẫn đến sự suy giảm nhẹ các tính chất. Nhìn chung, HPC xanh được phát triển cho thấy chất lượng tốt, với giá trị UPV vượt quá 3660 m/s và giá trị ESR lớn hơn 20 kΩ.cm.
Từ khóa: Bê tông hiệu năng cao, WSS, chất kết dính hoạt hóa kiềm, hiệu ứng chất độn.

Abstract: This study investigated the effect of waste silica sludge (WSS) on the mechanical properties of high-performance concrete (HPC) produced from alkali-activated GGBFS and waste red brick powder (WRB) at a constant water-to-solid ratio of 0.35. WSS was used to partially replace natural river sand at replacement levels of 0–40% (S0–S40). The hardened properties of HPC were evaluated through compressive strength, flexural strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), and electrical surface resistivity (ESR). The results indicated that incorporating 10–20% WSS improved the mechanical performance of HPC, while higher replacement levels slightly reduced the properties. In general, all mixtures showed good quality, with UPV values above 3660 m/s and ESR values exceeding 20 kΩ.cm, demonstrating the potential of WSS as a sustainable material in green HPC production.
Keywords: High-performance concrete, WSS, alkali-activated binder, filler eff

1. Đặt vấn đề

Sự phụ thuộc nặng nề vào cốt liệu mịn tự nhiên, đặc biệt là cát sông, đã dẫn đến khai thác quá mức, gây ra sự cạn kiệt đáng kể các nguồn tài nguyên thiên nhiên [1]. Việc khai thác quá mức này có thể ảnh hưởng tiêu cực đến môi trường và sinh kế của cộng đồng ven sông [2, 3]. Do đó, việc chuyển đổi sang các vật liệu thay thế bền vững đã trở thành một yêu cầu cấp bách để đảm bảo sự phát triển lâu dài của ngành xây dựng toàn cầu.

WSS, một sản phẩm phụ của quá trình chế biến cát silica, đã thu hút sự chú ý như một vật liệu xây dựng do kích thước hạt siêu mịn và hàm lượng SiO2 và Al2O3 cao [4]. Các nghiên cứu trước đây đã khám phá tiềm năng của WSS như một chất thay thế một phần cho xi măng Portland thông thường (OPC) [5, 6], hoặc như một tiền chất trong vật liệu hoạt hóa kiềm (AAM) [7]. Tuy nhiên, các ứng dụng như vậy thường yêu cầu các quy trình tiền xử lý, bao gồm hoạt hóa nhiệt [5] và nghiền cơ học [4], cả hai đều tốn nhiều năng lượng và thời gian. Ngoài ra, bản chất hạt mịn của WSS cũng có thể được sử dụng như một chất thay thế một phần cho cốt liệu mịn, góp phần làm đặc ma trận [3]. Ahmad et al. [3] báo cáo rằng việc thay thế cát tự nhiên bằng WSS lên đến 30% mang lại cường độ nén tương đương. Tương tự, Murthi et al. [8] đã chứng minh rằng cát sinh thái có thể thay thế cốt liệu mịn tự nhiên lên đến 25% mà không ảnh hưởng đến cường độ nén 28 ngày của bê tông cường độ cao.

Ngoài ra, vật liệu hoạt hóa kiềm (AAM) được coi là một giải pháp thay thế bền vững đầy hứa hẹn cho xi măng Portland thông thường (OPC), sử dụng các sản phẩm phụ công nghiệp làm tiền chất aluminosilicat — bao gồm xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS), tro bay và metakaolin — được hoạt hóa bằng dung dịch kiềm [9, 10]. Việc sử dụng kết hợp các tiền chất giàu canxi và ít canxi đã chứng minh tiềm năng mạnh mẽ trong việc đạt được sự cân bằng giữa độ bền cơ học và độ bền lâu dài [11]. GGBFS là vật liệu giàu canxi (với hàm lượng CaO hơn 40%) và cấu trúc vô định hình, thể hiện khả năng phản ứng cao trong môi trường kiềm. Sự tương tác hiệp đồng của nó với các vật liệu ít canxi đã được báo cáo rộng rãi [12-14]. Gần đây hơn, bột WRB từ các công trình bị phá dỡ đã được nghiên cứu như một nguồn aluminosilicat bổ sung; hàm lượng SiO_2 và Al_2O_3 đáng kể của nó thúc đẩy sự hình thành gel và góp phần phát triển độ bền trong hệ thống AAM [15-18].

Để khai thác tiềm năng của các vật liệu này, nghiên cứu này đã điều tra tính khả thi của việc thay thế một phần cốt liệu mịn tự nhiên bằng WSS trong các hệ thống bê tông hoạt hóa kiềm. Năm loại bê tông cường độ cao (HPC) hoạt hóa kiềm dựa trên GGBFS và WRB, với tỷ lệ nước/xi măng cố định là 0,35, đã được chuẩn bị với WSS thay thế một phần cát sông ở các mức độ từ 0-40%. Các đặc tính sau khi đông cứng được đánh giá thông qua cường độ nén, cường độ uốn, vận tốc xung siêu âm (UPV) và điện trở suất bề mặt (ESR) trong vòng 28 ngày bảo dưỡng.

2. Kế hoạch thí nghiệm

2.1. Vật liệu chế tạo và thành phần hỗn hợp

Trong nghiên cứu này, nguyên liệu ban đầu là GGBFS và WRB, trong khi cốt liệu mịn là WSS và cát sông tự nhiên. Bảng 1 mô tả cụ thể các nguyên liệu tiền chất như GGBFS và WRB. GGBFS được thu thập từ một công ty địa phương tại Việt Nam. Ngoài ra, WRB được thu được từ việc nghiền gạch phế thải, sàng lọc qua rây #200. WSS được thu được từ quá trình rửa cát xuất khẩu, chủ yếu chứa SiO2 và Al2O3. Dung dịch kiềm bao gồm dung dịch natri silicat (Na_2SiO_3) và dung dịch natri hydroxit (NaOH) ở nồng độ 10M. Dung dịch NaOH 10 M được pha chế 24 giờ trước khi trộn để ổn định trạng thái nhiệt động học trước khi sử dụng. Thêm vào đó, chất siêu dẻo (SP) được thêm vào với liều lượng 2% theo trọng lượng chất kết dính để duy trì khả năng thi công của hỗn hợp trong điều kiện hàm lượng nước thấp. Về thành phần cốt liệu tổng hợp, cát sông tự nhiên được sử dụng làm cốt liệu mịn chính và được thay thế một phần bằng WSS với tỷ lệ thay thế từ 0-40% theo trọng lượng (tương

ứng với các hỗn hợp được ký hiệu từ G70B30-S0 đến G70B30-S40). Phân bố kích thước hạt của cốt liệu mịn được trình bày trong Bảng 2.



Hình 1. Nguyên liệu thô cho bê tông cường độ cao (HPC): a. WSS; b. Cát tự nhiên; c. GGBFS; d. WRB

Bảng 1. Thành phần khoáng trong GGBFS và WRB

Thành phần hóa học (%)	Xỉ lò cao	Gạch đỏ
CaO	33.9	5.8
SiO_2	36.8	57.78
Fe_2O_3	0.05	6.2
$A_{l2}O_3$	12.56	17.54
MgO	7.02	3.59
K_2O	1.8	3.63
Na_2O	0.76	1.14
SO_3	1.6	1.96
LOI %	0.73	2.4

Tỷ lệ phối trộn được trình bày trong Bảng II. Các hỗn hợp HPC được thiết kế với các thông số cố định, bao gồm tỷ lệ W/S là 0,35, tỷ lệ GGBFS/WRB là 70:30 và tỷ lệ chất kết dính/cốt liệu (B/A) là 1:2. Ngược lại, thông số biến đổi là mức độ thay thế WSS bằng cát tự nhiên, dao động từ 0% đến 40%, tương ứng với các hỗn hợp G70B30-S0 đến G70B30-S40.

Bảng 2. Phân bố kích thước hạt tổng hợp của hỗn hợp HPC.

Cỡ sàng (mm)		**5**	**1.5**	**1.25**	**0.63**	**0.315**	**0.14**	**0.075**
Phần trăm lọt sàng (%)	**Cát tự nhiên**	**100**	**100**	**100**	**99.7**	**84.3**	**10.9**	**0**
	Cát silic	**100**	**100**	**99.9**	**98.6**	**94.5**	**87.2**	**64.4**

Bảng 3. Thành phần hỗn hợp trộn HPC với WSS theo tỷ lệ thích hợp để thay thế cát tự nhiên.

Cấp phối	W/S	GGBFS/ WRB	Chất kết dính/ cốt liệu	Cát silic/ cát tự nhiên
G70B30-S0	0.35	70:30	1:2	0:100
G70B30-S10	0.35	70:30	1:2	10:90
G70B30-S20	0.35	70:30	1:2	20:80
G70B30-S30	0.35	70:30	1:2	30:70
G70B30-S40	0.35	70:30	1:2	40:60

2.2. Chế tạo mẫu

Ban đầu, các nguyên liệu tiền chất, bao gồm GGBFS và WRB, được trộn khô trong máy trộn ở tốc độ thấp trong khoảng 2 phút cho đến khi đạt được hỗn hợp đồng nhất. Sau đó, nước trộn có chứa chất hoạt hóa kiềm được thêm vào từ từ trong khi vẫn duy trì tốc độ trộn thấp. Khi pha chất kết dính bắt đầu hình thành, tốc độ trộn được tăng lên mức trung bình. Tổng thời gian trộn ở giai đoạn này là khoảng 5 phút. Cuối cùng, cốt liệu mịn được thêm vào từ từ và trộn ở tốc độ trung bình thêm 2 phút nữa cho đến khi thu được hỗn hợp đồng nhất. Hỗn hợp mới được đổ vào khuôn và bề mặt được phủ một lớp màng mỏng. Khuôn được đặt trong điều kiện môi trường xung quanh. Sau 24 giờ, mẫu được tháo khuôn và đóng rắn trong điều kiện 25±2 oC và độ ẩm tương đối 90±5%.

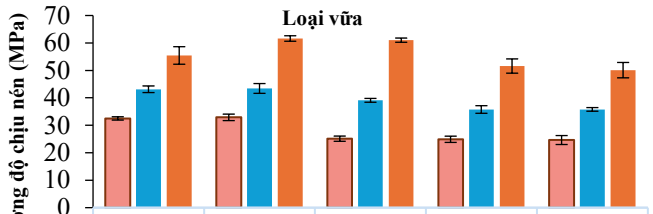
2.3. Phương pháp thí nghiệm

Các đặc tính cơ học và độ bền của bê tông cường độ cao (HPC) được xác định theo các tiêu chuẩn hiện hành để đảm bảo độ tin cậy và khả năng so sánh của kết quả thí nghiệm. Cường độ nén và cường độ uốn được đo theo tiêu chuẩn TCVN 3121:2003 của Việt Nam bằng mẫu hình lăng trụ có kích thước 40 × 40 × 160 mm. Thử nghiệm UPV tuân theo tiêu chuẩn TCVN 9357:2012. Ngoài ra, độ bền và khả năng chống chịu môi trường khắc nghiệt được đánh giá thông qua phép đo ESR theo tiêu chuẩn AASHTO TP95.

3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

3.1. Cường độ chịu nén

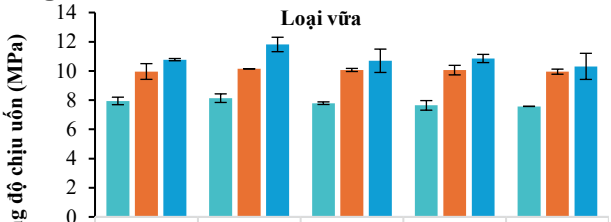
Hình 2 trình bày sự cải thiện cường độ nén của hỗn hợp HPC kết hợp WSS trong suốt thời gian bảo dưỡng 28 ngày. Kết quả cho thấy cường độ nén tăng liên tục đối với tất cả các hỗn hợp, điều này liên quan đến quá trình hydrat hóa của hệ thống chất kết dính hoạt hóa kiềm [19]. Kết quả cho thấy cường độ nén tăng lên khi thay thế WSS ở mức 10-20%, sau đó giảm dần khi mức thay thế cao hơn. Sau 28 ngày, G70B30-S10 và G70B30-S20 đạt cường độ nén cao nhất lần lượt là 61,6 MPa và 61,0 MPa, cho thấy mức tăng khoảng 10–11% so với hỗn hợp đối chứng S0 (55,4 MPa). Ngược lại, sau 28 ngày, cường độ nén của S30–S40 dao động từ 50,1 đến 51,6 MPa, tương ứng với mức giảm nhẹ khoảng 7–10% so với G70B30-S0. Xu hướng này có thể được giải thích là ở mức độ thay thế thấp, các hạt WSS siêu mịn có khả năng lấp đầy các khoảng trống giữa các hạt cát tự nhiên, do đó tăng cường độ chặt của cấu trúc vi mô [20]. Tuy nhiên, ở mức độ thay thế cao (30–40%), lượng hạt mịn quá nhiều với diện tích bề mặt riêng lớn làm tăng lượng nước tiêu thụ của hỗn hợp, dẫn đến tăng độ xốp mao dẫn [3, 20]. Ngoài ra, tỷ lệ WSS cao hơn tương ứng với diện tích bề mặt lớn hơn, đòi hỏi một lượng chất kết dính lớn để bao phủ hoàn toàn bề mặt của các hạt [3, 20]. Những tác động tiêu cực này do đó làm trầm trọng thêm sự giảm cường độ nén.



	G70B30-S0	G70B30-S10	G70B30-S20	G70B30-S30	G70B30-S40
3	32.5	32.9	25.1	24.9	24.6
7	43.1	43.4	39.1	35.8	35.8
28	55.4	61.6	61.0	51.6	50.1

Hình 2. Cường độ chịu nén của bê tông HPC

3.2. Cường độ chịu uốn



	G70B30-S0	G70B30-S10	G70B30-S20	G70B30-S30	G70B30-S40
Ru 3	7.95	8.13	7.79	7.64	7.57
Ru 7	9.96	10.15	10.07	10.05	9.95
Ru 28	10.77	11.81	10.70	10.85	10.31

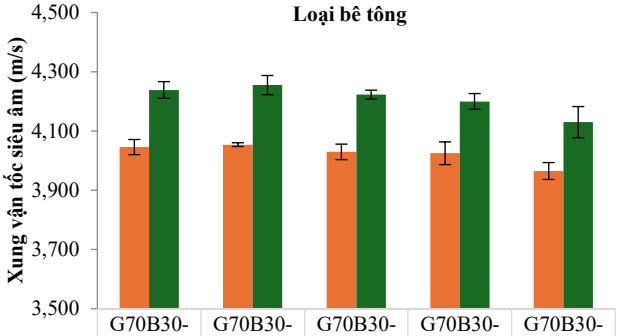
Hình 3. Cường độ chịu uốn của bê tông HPC

Hình 3 minh họa sự phát triển cường độ uốn của hỗn hợp HPC kết hợp các mức WSS khác nhau. Nhìn chung, tất cả các hỗn hợp đều cho thấy sự gia tăng liên tục về cường độ uốn cho đến 28 ngày. Kết quả cho thấy cường độ được cải thiện khi thay thế WSS lên đến 10%, sau đó giảm dần ở mức thay thế cao hơn. Ở 28 ngày, hỗn hợp G70B30-S10 đạt cường độ uốn cao nhất là 11,81 MPa, tăng khoảng 10% so với hỗn hợp đối chứng G70B30-S0 (10,77 MPa). Ngược lại, các hỗn hợp G70B30-S20, G70B30-S30 và G70B30-S40 ghi nhận các giá trị lần lượt là 10,7, 10,85 và 10,31 MPa, tương đương với S0. Có thể giải thích xu hướng này tương tự như đã thảo luận về cường độ nén ở trên. Sự cải thiện độ bền uốn ở mức thay thế 10% có thể là do các hạt WSS siêu mịn, hoạt động như chất độn vi mô lấp đầy các lỗ rỗng bên trong ma trận, do đó, tăng cường mật độ đóng gói [21]. Tuy nhiên, ở mức thay thế cao hơn, độ mịn tăng lên và nhu cầu nước của WSS dẫn đến giảm khả năng nén chặt [3]. Hơn nữa, diện tích bề mặt riêng lớn hơn đòi hỏi nhiều chất kết dính hơn để phủ lên các hạt một cách thích hợp [3, 20], do đó hạn chế khả năng chống chịu tổng thể của bê tông đối với lực uốn.

3.3. Xung vận tốc siêu âm

UPV là một kỹ thuật không phá hủy được sử dụng rộng rãi để đánh giá độ đặc, tính đồng nhất và tính toàn vẹn bên trong của bê tông [22]. Giá trị UPV của hỗn hợp HPC kết hợp WSS ở 7 và 28 ngày được trình bày trong Hình 3. Kết quả thực nghiệm cho thấy giá trị UPV của tất cả các hỗn hợp tăng liên tục theo thời gian, phản ánh quá trình hydrat hóa và làm đặc vi cấu trúc đang diễn ra [22]. Giá trị UPV thường dao động từ khoảng 4000 m/s ở 7 ngày đến khoảng 4200 m/s, được phân loại là chất lượng "Tốt", tương ứng với bê tông chất lượng "tốt" theo phân loại do Malhotra et al. đề xuất [23]. Ví dụ, hỗn hợp đối chứng (G70B30-S0) thể hiện sự tăng trưởng giá trị UPV khoảng 4,8%, trong khi các hỗn hợp chứa WSS cho thấy mức tăng tương tự khoảng 4,2–5,0%.

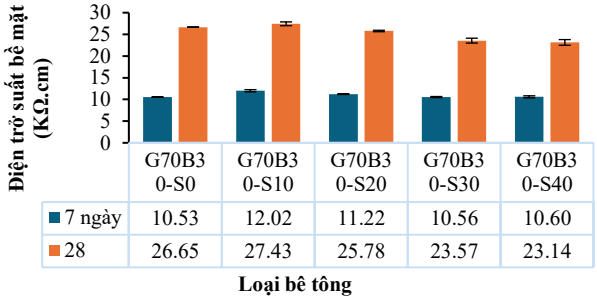
Việc kết hợp WSS lên đến 20% vào ma trận HPC duy trì hoặc cải thiện nhẹ giá trị UPV so với đối chứng, cho thấy vi cấu trúc phát triển tốt và đặc chắc. Ở ngày thứ 7, hỗn hợp với tỷ lệ thay thế 10–20% cho thấy giá trị UPV là 4030–4054 m/s, tăng lên 4223–4255 m/s ở ngày thứ 28, tương đương hoặc cao hơn một chút so với G70B30-S0. Sự cải thiện này có thể là do hiệu ứng chất độn vi mô của WSS, giúp tăng cường sự sắp xếp hạt và giảm khoảng trống bên trong ma trận [21]. Ngược lại, mức độ thay thế cao hơn (30–40%) dẫn đến sự giảm nhẹ UPV. Hỗn hợp G70B30-S30 và G70B30-S40 cho thấy giá trị thấp hơn là 3965–4025 m/s ở ngày thứ 7 và 4130–4210 m/s ở ngày thứ 28. Sự suy giảm này liên quan đến diện tích bề mặt riêng và nhu cầu nước tăng lên, có thể làm tăng độ xốp mao dẫn và giảm mật độ ma trận [3]. Xu hướng này phù hợp với sự phát triển cường độ được quan sát.



	G70B30-S0	G70B30-S10	G70B30-S20	G70B30-S30	G70B30-S40
7	4046	4054	4030	4025	3965
28	4239	4255	4223	4200	4130

Hình 3. Xung vận tốc siêu âm bê tông HPC

3.4. Điện trở suất bề mặt



	G70B30-S0	G70B30-S10	G70B30-S20	G70B30-S30	G70B30-S40
7 ngày	10.53	12.02	11.22	10.56	10.60
28	26.65	27.43	25.78	23.57	23.14

Hình 4. Điện trở suất bề mặt bê tông HPC

ESR là một chỉ số quan trọng phản ánh khả năng chống lại sự xâm nhập của các ion có hại và độ đặc chắc của cấu trúc lỗ rỗng trong bê tông [24]. Hình 4 minh họa sự thay đổi điệ
n trở suất bề mặt (ESR) của hỗn hợp HPC kết hợp WSS trong suốt thời gian bảo dưỡng. Nhìn chung, các giá trị điện trở suất bề mặt ở 28 ngày, dao động từ 23,14 đến 27,43 kΩ·cm, được phân loại là có khả năng thấm ion clorua "Thấp" theo tiêu chuẩn AASHTO TP95 [24]. Kết quả thực nghiệm cho thấy các giá trị ESR của tất cả các hỗn hợp nhìn chung tăng theo thời gian bảo dưỡng, phản ánh sự tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng và sự phát triển dần dần của ma trận chất kết dính hoạt hóa kiềm.

Việc thay thế WSS ở mức 10-20% dẫn đến giá trị ESR tăng lên so với hỗn hợp đối chứng. Sự cải thiện này có thể là do các hạt mịn của WSS, giúp tăng mật độ đóng gói và giảm khả năng kết nối lỗ rỗng, do đó hạn chế sự vận chuyển điện tích qua dung dịch lỗ rỗng [21]. Như hình minh họa, các hỗn hợp với tỷ lệ thay thế 10–20% cho thấy giá trị ESR dao động từ 11,2 đến 12,0 kΩ·cm ngay từ ngày thứ

7, cao hơn đáng kể so với mẫu đối chứng G70B30-S0 (10,5 kΩ·cm), trong đó G70B30-S10 đạt giá trị cao nhất. Sau 28 ngày, các hỗn hợp này vẫn duy trì ưu thế với giá trị ESR từ 25,8–27,4 kΩ·cm; cụ thể, G70B30-S10 đạt 27,4 kΩ·cm, cao hơn khoảng 2,9% so với S0. Ngược lại, các hỗn hợp với tỷ lệ thay thế cao hơn (tức là G70B30-S30 và G70B30-S40) cho thấy tác động tiêu cực đến ESR. Như thể hiện trong hình, G70B30-S30 và G70B30-S40 ghi nhận giá trị điện trở suất thấp hơn một chút so với mẫu đối chứng, với giá trị chỉ 10,56–10,60 kΩ·cm ở ngày thứ 7 và 23,1–23,6 kΩ·cm, vẫn thấp hơn S0. Mức độ thay thế WSS cao hơn làm tăng các hạt mịn và lượng nước tiêu thụ, dẫn đến giảm độ nén [3], do đó, làm tăng tính thấm của ion và giảm giá trị ESR.

4. Kết luận

Nghiên cứu này khám phá tiềm năng của WSS khi được sử dụng như là vật liệu thay thế một phần cho cát tự nhiên trong bê tông hiệu suất cao (HPC) dựa trên hệ thống liên kết kích hoạt kiềm GGBFS–WRB. Các kết quả chính được tóm tắt như sau:

• Việc bổ sung WSS ở mức 10–20% trong HPC đã cải thiện cường độ nén, cường độ uốn, tốc độ sóng siêu âm (UPV) và điện trở bề mặt (ESR) so với hỗn hợp đối chứng, trong khi các mức thay thế cao hơn dẫn đến hiệu suất giảm nhẹ.

• Các giá trị UPV và điện trở bề mặt đo được trên tất cả các hỗn hợp cho thấy chất lượng tốt và độ bền cao của HPC.

• Các kết quả này làm nổi bật tiềm năng của WSS trong việc phát triển HPC bền vững, góp phần giảm sự phụ thuộc vào cát sông tự nhiên và hạ thấp tác động môi trường của ngành xây dựng.

Tài liệu tham khảo

[1] P.K. Sharma, A.J.N. MacLeod, L.P. Aldridge, F. Collins, W.P. Gates, Gravel wash fines with mixed mineralogy as sources of supplementary cementitious material in cement mortars, Constr. Build. Mater 496 (2025) 143852.

[2] O. Restrepo-Baena, F. Cabrera-Poloche, J.I. Tobón, S. Escudero-Restrepo, S. Álvarez-Zuluaga, Valorization of waste from sand wash muds of an aggregates plant: Evaluation as a supplementary cementitious material, International Journal of Applied Ceramic Technology 17(6) (2020) 2669-2680.

[3] J. Ahmad, F. Aslam, O. Zaid, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, Mechanical and durability characteristics of sustainable concrete modified with partial substitution of waste foundry sand, Structural Concrete 22 (2021) 2775-2790.

[4] Y.J.B. Tabak, The utilization of wet silica sand sludge as an additive in different temperature sustainable brick production, 15(6) (2025) 849.

[5] V.B. Thapa, D. Waldmann, C. Simon, Gravel wash mud, a quarry waste material as supplementary cementitious material (SCM), Cem. Concr. Res. 124 (2019) 105833.

[6] V. Thapa, D. Waldmann, Binary blended cement pastes and concrete using gravel wash mud (GWM) powders, Constr. Build. Mater 302 (2021) 124225.

[7] V.B. Thapa, D. Waldmann, J.-F. Wagner, A. Lecomte, Assessment of the suitability of gravel wash mud as raw material for the synthesis of an alkali-activated binder, Applied Clay Science 161 (2018) 110-118.

[8] P. Murthi, P. Awoyera, P. Selvaraj, D. Dharsana, R. Gobinath, Using silica mineral waste as aggregate in a green high strength concrete: workability, strength, failure mode, and morphology assessment, Australian Journal of Civil Engineering 16(2) (2018) 122-128.

[9] J.L. Provis, Alkali-activated materials, Cem. Concr. Res. 114 (2018) 40-48.

[10] J.L. Provis, 4 - Activating solution chemistry for geopolymers, in: J.L. Provis, J.S.J. van Deventer (Eds.), Geopolymers, Woodhead Publishing2009, pp. 50-71.

[11] N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov, Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste, Materials & Design 85 (2015) 324-331.

[12] D. Bondar, M. Basheer, S. Nanukuttan, Suitability of alkali activated slag/fly ash (AA-GGBS/FA) concretes for chloride environments: Characterisation based on mix design and compliance testing, Constr. Build. Mater 216 (2019) 612-621.

[13] D.-H. Vo, C.-L. Hwang, M.D. Yehualaw, M.-C. Liao, The influence of MgO addition on the performance of alkali-activated materials with slag−rice husk ash blending, J. Build. Eng 33 (2021) 101605.

[14] P.H.R. Borges, N. Banthia, H.A. Alcamand, W.L. Vasconcelos, E.H.M. Nunes, Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag alkali-activated mortars, Cem. Concr. Compos. 71 (2016) 42-52.

[15] M.D. Yehualaw, C.-L. Hwang, D.-H. Vo, A. Koyenga, Effect of alkali activator concentration on waste brick powder-based ecofriendly mortar cured at ambient temperature, J. Mater. Cycles Waste Manage. 23(2) (2021) 727-740.

[16] C.-L. Hwang, M. Damtie Yehualaw, D.-H. Vo, T.-P. Huynh, Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders, Constr. Build. Mater 218 (2019) 519-529.

[17] C.-L. Hwang, M.D. Yehualaw, D.-H. Vo, T.-P. Huynh, A. Largo, Performance evaluation of alkali activated mortar containing high volume of waste brick powder blended with ground granulated blast furnace slag cured at ambient temperature, Constr. Build. Mater 223 (2019) 657-667.

[18] L. Reig, M.M. Tashima, M.V. Borrachero, J. Monzó, C.R. Cheeseman, J. Payá, Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste, Constr. Build. Mater 43 (2013) 98-106.

[19] S. Sharmin, P.K. Sarker, W.K. Biswas, R.M. Abousnina, U. Javed, Characterization of waste clay brick powder and its effect on the mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar, Constr. Build. Mater 412 (2024) 134848.

[20] M. Ramesh, S. Sentilkumar, A. Prakash, B. Das, I.-M. Chung, S.-H. Kim, M. Prabakaran, Use of Industrial Silica Sand as a Fine Aggregate in Concrete—An Explorative Study, Buildings 12 (2022) 1273.

[21] A.O. Mashaly, B.A. El-Kaliouby, B.N. Shalaby, A.M. El – Gohary, M.A. Rashwan, Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks, J. Cleaner Prod. 112 (2016) 731-741.

[22] D.-H. Vo, C.-L. Hwang, K.-D. Tran Thi, M.D. Yehualaw, M.-C. Liao, Y.-F. Chao, HPC produced with CDW as a partial replacement for fine and coarse aggregates using the Densified Mixture Design Algorithm (DMDA) method: Mechanical properties and stability in development, Constr. Build. Mater 270 (2021) 121441.

[23] V. Malhotra, Testing hardened concrete: nondestructive methods, (1976).

Thông tin tác giả

	Nguyễn Cẩm Tú: - Tóm tắt quá trình học tập, nghiên cứu; sinh viên năm 2 - Lĩnh vực quan tâm; Vật liệu Xanh, vật liệu tái chế - Điện thoại:0792364431
	Đặng Tuấn: - Tóm tắt quá trình học tập, nghiên cứu; sinh viên năm 3 - Lĩnh vực quan tâm; Vật liệu Xanh, ứng dụng công nghệ xây dựng mới. - Điện thoại:0984098767
	Nguyễn Nhật Quyến: - Tóm tắt quá trình học tập, nghiên cứu; sinh viên năm 4 - Lĩnh vực quan tâm; Vật liệu Xanh, ứng dụng công nghệ xây dựng mới. - Điện thoại: 0393159835