

DỰ BÁO CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN CỦA VỮA CHỨA BÃ CÀ PHÊ BẰNG VẬN TỐC TRUYỀN XUNG SIÊU ÂM TRONG CÁC MÔI TRƯỜNG XÂM THỰC KHÁC NHAU

PREDICTING THE COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTAR CONTAINING
SPENT COFFEE GROUNDS USING ULTRASONIC PULSE VELOCITY UNDER
VARIOUS AGGRESSIVE ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Lê Thị Thanh Tâm^{1*},
Lê Thị Thương¹,
Lưu Đình Thi¹,
Kee Nyiatouxemoua²

¹ Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Hồng Đức;

² Học viên Cao học lớp K16 ngành Kỹ thuật xây dựng,
Trường Đại học Hồng Đức;

*Tác giả liên hệ; Email: lethithanhtam@hdu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.3030-4628.90.09.2026.1239>

Ngày nộp bài: 31/03/2026; Ngày gửi phản biện: 20/04/2026; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

Từ khóa:

Vữa xây dựng, bã cà phê, cường độ chịu nén, vận tốc truyền xung siêu âm, môi trường xâm thực.

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát mối quan hệ cường độ chịu nén, vận tốc truyền xung siêu âm và hàm lượng bã cà phê khi sử dụng bã cà phê thay thế một phần cát tự nhiên trong thành phần cấp phối của vữa xây dựng dưới các điều kiện môi trường xâm thực khác nhau, bao gồm môi trường nước, môi trường muối sunfat, môi trường muối clorua và môi trường hỗn hợp muối sunfat và muối clorua. Các hỗn hợp vữa được chế tạo với tỷ lệ bã cà phê thay thế cát từ 0% đến 20% theo khối lượng. Kết quả cho thấy ở tất cả các môi trường cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm đều tăng theo thời gian, nhưng giảm khi tăng hàm lượng bã cà phê thay thế cát. Nghiên cứu đã xây dựng các phương trình để dự đoán cường độ chịu nén tại 28 và 56 ngày tuổi dựa trên hàm lượng bã cà phê và vận tốc truyền xung siêu âm bằng phân tích hồi quy. Các tương quan được đề xuất này cho thấy sự phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm trong phạm vi khảo sát.

Keywords:

Mortar, spent coffee grounds, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, aggressive environmental conditions.

ABSTRACT

This study investigates the relationship between compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), and spent coffee grounds content in mortar mixtures where spent coffee grounds were used as a partial replacement for natural sand under different aggressive environmental conditions, including water, sulfate solution, chloride solution, and a combined sulfate–chloride solution. Mortar specimens were prepared with spent coffee grounds replacement levels ranging from 0% to 20% by mass of

sand. The results indicate that, in all exposure conditions, both compressive strength and ultrasonic pulse velocity increased with curing time but decreased as the spent coffee grounds replacement level increased. Regression analysis was employed to develop predictive equations for estimating the compressive strength at 28 and 56 days based on spent coffee ground content and ultrasonic pulse velocity. The proposed empirical correlations showed good agreement with the experimental data within the investigated range.

1. MỞ ĐẦU

Bã cà phê là phụ phẩm rắn phát sinh với khối lượng lớn từ quá trình tiêu thụ và chế biến cà phê, một trong những nông sản phổ biến nhất trên thế giới. Hiện nay, phần lớn lượng bã cà phê này vẫn được xử lý bằng phương pháp chôn lấp hoặc đốt bỏ, gây ra nhiều hệ lụy môi trường như phát thải khí nhà kính, ô nhiễm đất, nước và lãng phí nguồn tài nguyên hữu cơ có giá trị. Trong bối cảnh lượng chất thải thực phẩm toàn cầu không ngừng gia tăng, việc tái sử dụng các phụ phẩm hữu cơ như bã cà phê được xem là một hướng đi quan trọng, vừa mang lại lợi ích kinh tế đáng kể, vừa góp phần giảm phát thải carbon và thúc đẩy phát triển bền vững theo mô hình kinh tế tuần hoàn [1]. Với đặc tính giàu cacbon, cấu trúc xốp, kích thước hạt mịn và khả năng tương thích với nhiều loại vật liệu nền, bã cà phê được đánh giá là nguồn nguyên liệu thứ cấp đầy tiềm năng trong lĩnh vực vật liệu xây dựng. Tuy nhiên, do chứa nhiều hợp chất hữu cơ như caffeine, tannin và polyphenol, quá trình phân hủy tự nhiên của bã cà phê tiêu tốn nhiều oxy và có thể gây ra các vấn đề môi trường như phát sinh khí methane (CH_4), CO_2 , mùi khó chịu và thậm chí nguy cơ tự bốc cháy khi tích tụ với khối lượng lớn [2]. Đồng thời, sự hiện diện của các hợp chất hữu cơ này cũng có thể cản trở quá trình thủy hóa của xi măng, làm suy giảm cường độ cơ học của vật liệu nếu không được xử lý phù hợp. Do đó, các phương pháp xử lý như nhiệt phân đã được nghiên cứu nhằm loại bỏ các thành phần hữu cơ bất lợi và cải thiện khả năng sử dụng bã cà phê trong vật liệu xây dựng [3].

Trong những năm gần đây, bã cà phê đã được nghiên cứu ứng dụng trong nhiều loại vật liệu như bê tông [3][4], thạch cao [5] và gạch bê tông [6]. Kết quả cho thấy, việc sử dụng bã cà phê có thể giúp giảm khối lượng thể tích và cải thiện khả năng cách nhiệt của vật liệu. Tuy nhiên, ảnh hưởng đến cường độ cơ học phụ thuộc lớn vào hàm lượng và phương pháp xử lý bã cà phê. Các nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra rằng, bã cà phê chưa qua xử lý thường làm giảm đáng kể cường độ chịu nén do cản trở phản ứng thủy hóa, trong khi bã cà phê đã qua nhiệt phân ở nhiệt độ thích hợp có thể cải thiện hoặc duy trì cường độ của bê tông ở một số tỷ lệ thay thế nhất định [3]. Ngoài ra, việc bổ sung bã cà phê cũng ảnh hưởng đến các tính chất khác như độ linh động và khả năng cách nhiệt của vật liệu [4], [5]. Mặc dù vậy, các nghiên cứu hiện nay còn tương đối hạn chế, đặc biệt là đối với vật liệu vữa xây dựng và trong các điều kiện môi trường làm việc khác nhau.

Bên cạnh các thí nghiệm cơ học truyền thống, phương pháp đo vận tốc truyền xung siêu âm được sử dụng rộng rãi như một phương pháp không phá hủy để đánh giá chất lượng và cấu trúc bên trong của vật liệu. Nguyên lý của phương pháp này dựa trên việc đo thời gian lan truyền của sóng siêu âm qua vật liệu; vận tốc truyền xung phụ thuộc vào độ đặc chắc, tính đồng nhất và sự tồn tại của khuyết tật như lỗ rỗng hoặc vết nứt. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra mối tương quan nhất định giữa vận tốc truyền xung siêu âm và cường độ chịu nén của bê tông [7]-[9], cho phép sử dụng giá trị vận tốc truyền xung siêu âm như một công cụ đánh giá gián tiếp chất lượng vật liệu, mặc dù vẫn tồn tại sai số và phụ thuộc vào nhiều yếu tố ảnh hưởng.

Về bản chất, cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm có mối quan hệ chặt chẽ với nhau. Trong khi cường độ chịu nén phản ánh khả năng chịu tải của vật liệu, thì vận tốc truyền xung siêu âm lại đặc trưng cho mức độ đặc chắc, tính đồng nhất và sự tồn tại của các khuyết tật bên trong cấu trúc. Thực tế cho thấy, các mẫu vật liệu có giá trị vận tốc truyền xung siêu âm cao thường tương ứng với cường độ chịu nén lớn. Mặc dù mối quan hệ này có thể chịu ảnh hưởng bởi một số yếu tố như tuổi mẫu hay điều kiện bảo dưỡng, song các yếu tố này nhìn chung không làm thay đổi đáng kể xu hướng tương quan. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung xây dựng mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm của vữa có sử dụng bã cà phê với các hàm lượng khác nhau. Các mẫu được khảo sát tại các thời điểm 28 và 56 ngày tuổi, đồng thời được bảo dưỡng trong các môi trường khác nhau bao gồm môi trường nước, môi trường xâm thực sunfat và môi trường xâm thực clorua. Từ mối quan hệ thu được, nghiên cứu hướng tới việc đề xuất phương pháp dự đoán cường độ chịu nén cho các loại vữa có sử dụng bã cà phê làm cốt liệu, góp phần mở rộng khả năng ứng dụng của loại vật liệu này trong thực tiễn.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm xi măng, cát, bã cà phê, nước, vôi bột và phụ gia siêu dẻo. Xi măng sử dụng là loại PCB40 có khối lượng riêng $3,15 \text{ tấn/m}^3$. Cát được sử dụng là cát sông tự nhiên, có khối lượng riêng $2,62 \text{ tấn/m}^3$, được sàng chọn trong khoảng kích thước hạt từ 0,15 đến 1,25 mm nhằm đảm bảo sự tương đồng về kích thước với bã cà phê, phù hợp cho mục đích chế tạo vữa trát. Bã cà phê được thu gom từ các cơ sở kinh doanh đồ uống, sau đó được xử lý qua nhiều công đoạn nhằm loại bỏ tạp chất và ổn định tính chất vật liệu. Cụ thể, bã cà phê được rửa sạch nhiều lần, phơi khô và bảo quản đến khi thí nghiệm. Trước khi sử dụng, vật liệu này tiếp tục được xử lý bằng cách ngâm trong dung dịch NaOH 2% trong 2 giờ, sau đó đun sôi thêm 2 giờ để loại bỏ các hợp chất hữu cơ còn lại. Sau quá trình xử lý, bã cà phê được để ráo nước qua sàng có kích thước lỗ sàng 0,15 mm và được sử dụng ở trạng thái bão hòa nước khi trộn vữa. Việc sử dụng bã cà phê ở trạng thái này nhằm hạn chế hiện tượng hút nước mạnh do cấu trúc xốp của vật liệu, từ đó đảm bảo tính ổn định của cấp phối.

Đối với các mẫu có sử dụng bã cà phê, vôi bột được bổ sung với hàm lượng 1% so với khối lượng xi măng nhằm cải thiện khả năng ninh kết và thúc đẩy quá trình phát triển cường độ của mẫu vữa. Điều này là cần thiết do sự có mặt của các hợp chất hữu cơ trong

bã cà phê có khả năng làm chậm quá trình thủy hóa của xi măng. Vôi bột sử dụng có khối lượng riêng $2,21 \text{ tấn/m}^3$. Phụ gia siêu dẻo giảm nước loại Sikament NN (khối lượng riêng $1,15 \text{ tấn/m}^3$) được sử dụng nhằm tăng độ linh động của hỗn hợp vữa đồng thời giảm lượng nước trộn, góp phần nâng cao tính công tác của vật liệu.

2.2. Thiết kế thành phần cấp phối

Thành phần cấp phối của các hỗn hợp vữa được trình bày cụ thể trong Bảng 1. Trong đó mẫu đối chứng được thiết kế trước với tỷ lệ nước/xi măng bằng 0,4 ; tỷ lệ cát/xi măng bằng 2, hàm lượng phụ gia siêu dẻo chiếm 1% so với xi măng. Sau đó lần lượt thay thế cát tự nhiên bằng bã cà phê với các tỷ lệ thay thế là 5%, 10%, 15% và 20% theo khối lượng. Mẫu chuẩn không chứa bã cà phê được kí hiệu là BCP00, các mẫu sử dụng bã cà phê thay thế cát với các hàm lượng 5%, 10%, 15% và 20% theo khối lượng được ký hiệu lần lượt là BCP05, BCP10, BCP15 và BCP20.

Bảng 1. Thành phần cấp phối các mẫu vữa theo tỷ lệ khối lượng

Tên mẫu	Xi măng	Vôi	Cát	BCP	Nước	PG
BCP00	1.00	0.00	2.00	0.00	0.40	0.010
BCP05	0.99	0.01	1.95	0.05	0.40	0.010
BCP10	0.99	0.01	1.90	0.10	0.40	0.010
BCP15	0.99	0.01	1.85	0.15	0.40	0.010
BCP20	0.99	0.01	1.80	0.20	0.40	0.010

Ghi chú: BCP= bã cà phê, PG= phụ gia siêu dẻo.

2.3. Chuẩn bị mẫu và phương pháp thí nghiệm

Các vật liệu đầu vào được định lượng cho từng mẻ trộn theo cấp phối thiết kế. Quá trình trộn được thực hiện theo trình tự: trước tiên, các thành phần khô gồm xi măng, vôi bột, cát và bã cà phê được trộn trong khoảng 3 phút nhằm đảm bảo phân bố đồng đều. Sau đó khoảng 2/3 hỗn hợp nước trộn và phụ gia siêu dẻo được đưa vào máy trộn trong thời gian 2-3 phút. Tiếp theo, phần nước và phụ gia còn lại được bổ sung và tiếp tục trộn cho đến khi đạt được hỗn hợp đồng nhất. Độ lưu động của vữa được kiểm tra theo tiêu chuẩn ASTM C1437 [10]; chỉ những hỗn hợp đạt giá trị trong khoảng 155-185 mm mới được sử dụng để đúc mẫu, trong trường hợp không đạt sẽ được điều chỉnh bằng phụ gia siêu dẻo. Các mẫu vữa được đúc theo kích thước tiêu chuẩn $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ nhằm phục vụ cho việc thí nghiệm xác định cường độ chịu nén và đo vận tốc truyền xung siêu âm. Trước khi đúc, khuôn được bôi một lớp dầu nhằm thuận tiện cho quá trình tháo khuôn. Thời gian tháo khuôn phụ thuộc vào thành phần cấp phối: các mẫu đối chứng và mẫu có hàm lượng bã cà phê thấp (5%) được tháo sau 24 giờ, trong khi các mẫu có hàm lượng bã cà phê cao hơn được tháo sau 48 giờ nhằm đảm bảo đủ cường độ ban đầu.

Sau khi tháo khuôn, các mẫu được bảo dưỡng trong các điều kiện môi trường khác nhau, bao gồm: môi trường nước tự nhiên, dung dịch Na_2SO_4 5%, dung dịch NaCl 5% và dung dịch hỗn hợp Na_2SO_4 5% - NaCl 5% nhằm mô phỏng điều kiện xâm thực. Tại 28 và 56 ngày tuổi, các mẫu được tiến hành đo vận tốc truyền xung siêu âm theo tiêu chuẩn ASTM C597 [11], sau đó xác định cường độ chịu nén theo tiêu chuẩn ASTM C349

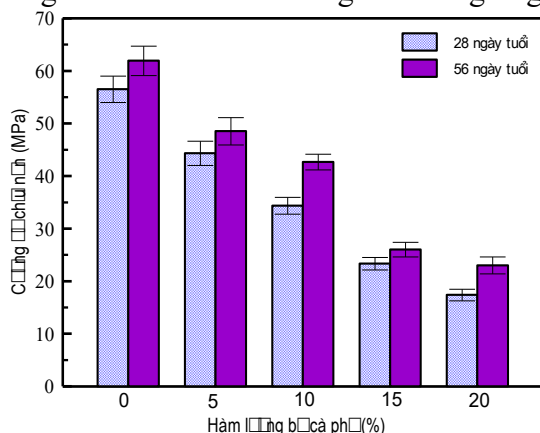
[12]. Các giá trị trình bày trong nghiên cứu này là giá trị trung bình của ba mẫu thử. Kết quả thu được được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của môi trường xâm thực đến tính chất cơ học của vữa, đồng thời xây dựng các phương trình dự đoán cường độ chịu nén dựa trên vận tốc truyền xung siêu âm và hàm lượng bã cà phê bằng phương pháp phân tích hồi quy thực nghiệm. Các phương trình này được sử dụng làm cơ sở cho việc phân tích và dự đoán chất lượng vật liệu.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

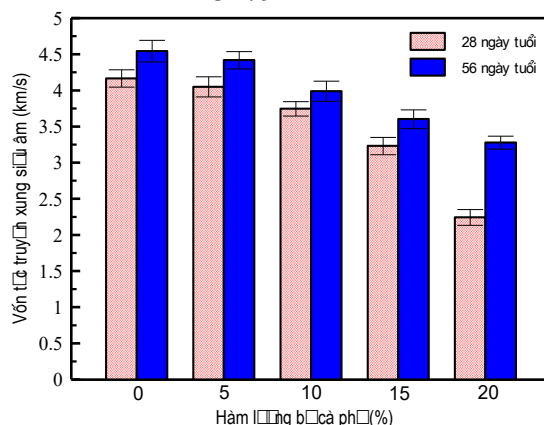
3.1. Các mẫu vữa ngâm trong nước

Cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm bảo dưỡng trong môi trường nước ở 28 và 56 ngày tuổi được thể hiện tương ứng như Hình 1 và Hình 2. Kết quả thí nghiệm cho thấy cả hai đại lượng này đều tăng theo thời gian. Cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ở 56 ngày tuổi đều cao hơn so với các mẫu vữa ở 28 ngày tuổi có cùng hàm lượng bã cà phê. Hiện tượng này được giải thích bởi sự tiếp diễn của quá trình thủy hóa theo thời gian, các sản phẩm sinh ra từ phản ứng thủy hóa dần lấp đầy lỗ rỗng, làm cho vữa trở nên đặc chắc hơn, từ đó làm tăng cường độ chịu nén của mẫu. Mẫu đặc chắc hơn cũng giúp khả năng truyền sóng siêu âm trong mẫu được cải thiện, làm gia tăng giá trị vận tốc truyền xung siêu âm theo thời gian.

Ở 28 ngày tuổi, khi tỷ lệ bã cà phê thay thế cát tăng từ 0% lên 20%, cường độ chịu nén của các mẫu vữa giảm đáng kể, từ khoảng 56 MPa xuống còn 17 MPa. Cũng tương tự đối với cường độ chịu nén của các mẫu ở 56 ngày tuổi, giá trị cường độ giảm từ 62 MPa xuống còn 23 MPa. Kết quả này tương đồng với các kết quả từ nghiên cứu trước của Roychand và cộng sự [3]. Sự suy giảm cường độ chịu nén theo sự gia tăng của tỷ lệ bã cà phê trong thành phần cấp phối được giải thích là do đặc tính của bã cà phê, vốn chứa nhiều tạp chất có khả năng cản trở quá trình thủy hóa của xi măng [3]. Với vận tốc truyền xung siêu âm, mẫu đối chứng đạt giá trị khoảng 4167 m/s ở 28 ngày tuổi và 4545 m/s ở 56 ngày tuổi. Tuy nhiên khi thay thế 20% cát tự nhiên bởi bã cà phê, vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu giảm tương ứng còn 2244 m/s và 3279 m/s.



Hình 1. Cường độ chịu nén của các mẫu vữa ngâm trong nước



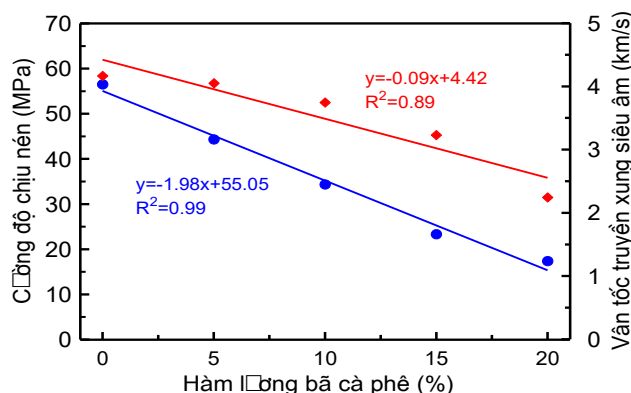
Hình 2. Vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm trong nước

Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén, vận tốc truyền xung siêu âm với hàm lượng bã cà phê được thể hiện trên Hình 3, các mối quan hệ này được biểu diễn bởi các hàm số tuyến tính. Có thể thấy, hàm lượng bã cà phê có ảnh hưởng lớn đến cường độ chịu nén của các mẫu vữa [3]. Trong khi đó, giá trị vận tốc truyền xung siêu âm thường được sử dụng để đánh giá chất lượng tương đối của các mẫu vữa [9], hoặc có thể được sử dụng để ước lượng giá trị cường độ chịu nén [7], [8]. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén với hàm lượng bã cà phê và giá trị vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa bảo dưỡng trong nước ở 28 và 56 ngày tuổi được thể hiện thông qua phương trình (1) và (2) bằng phân tích hồi quy tương ứng như sau:

$$f'_c = 81.89 - 2.55x - 6.06y \quad \text{với } R^2 = 0.999 \quad (1)$$

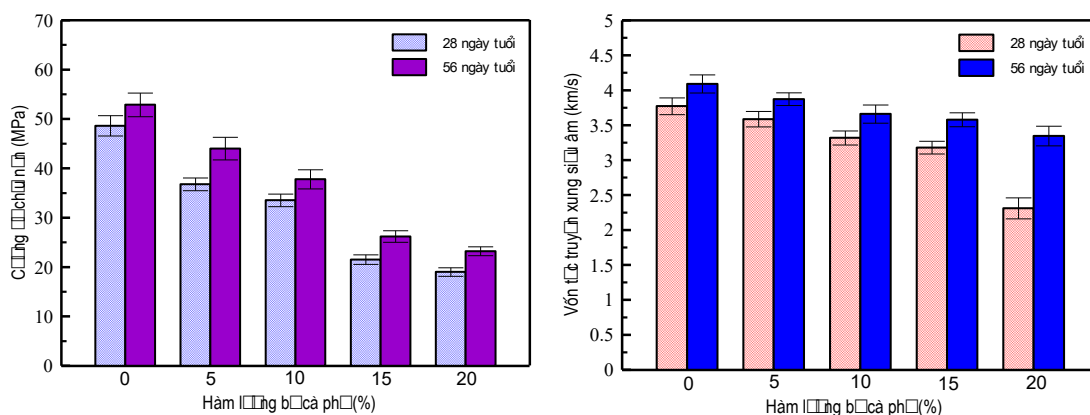
$$f'_c = 91.36 - 2.54x - 6.48y \quad \text{với } R^2 = 0.997 \quad (2)$$

Trong đó : x =hàm lượng bã cà phê (%), y =vận tốc truyền xung siêu âm (km/s), f'_c = cường độ chịu nén của vữa (MPa).



Hình 3. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm với hàm lượng bã cà phê

3.2. Các mẫu vữa ngâm trong dung dịch Na_2SO_4



Hình 4. Cường độ chịu nén của các mẫu vữa ngâm trong dung dịch Na_2SO_4

Hình 5. Vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm trong dung dịch Na_2SO_4

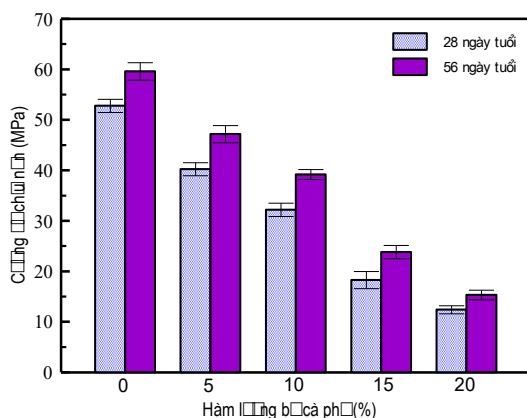
Hình 4 và Hình 5 thể hiện cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa được ngâm trong dung dịch Na_2SO_4 5%. Nhìn chung, cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm trong dung dịch Na_2SO_4 cũng có xu hướng tương tự như các mẫu vữa ngâm trong nước, cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm tăng dần theo thời gian nhưng có xu hướng giảm đi khi hàm lượng bã cà phê thay thế cát trong thành phần cấp phối tăng lên. Cụ thể, ở 28 ngày tuổi, mẫu đối chứng có cường độ chịu nén là 48,6 MPa và vận tốc truyền xung siêu âm là 3774 m/s. Khi sử dụng 20% bã cà phê thay thế cát tự nhiên trong thành phần cấp phối, các giá trị này giảm xuống còn 19 MPa và 2312 m/s. Đến 56 ngày tuổi, xu hướng giảm tiếp tục được ghi nhận khi cường độ chịu nén giảm từ 53 MPa xuống còn 23 MPa, trong khi vận tốc truyền xung siêu âm giảm từ 4092 m/s xuống còn 3347 m/s tương ứng với hàm lượng bã cà phê thay thế cát tăng từ 0% lên 20%.

Cũng bằng phân tích hồi quy, mối quan hệ giữa cường độ chịu nén với hàm lượng bã cà phê và giá trị vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm trong dung dịch Na_2SO_4 5% ở 28 và 56 ngày tuổi được thể hiện thông qua phương trình (3) và (4) tương ứng như sau:

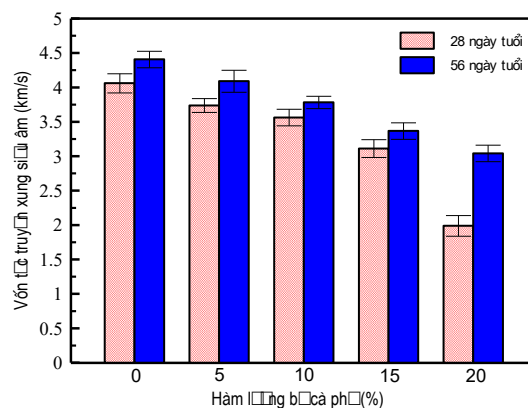
$$f'_c = 67.98 - 2.46x - 4.92y \quad \text{với } R^2 = 0.997 \quad (3)$$

$$f'_c = 69.74 - 2.52x - 4.11y \quad \text{với } R^2 = 0.997 \quad (4)$$

3.3. Các mẫu vữa ngâm trong dung dịch NaCl



Hình 6. Cường độ chịu nén của các mẫu vữa ngâm trong dung dịch NaCl



Hình 7. Vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm trong dung dịch NaCl

Cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm trong dung dịch NaCl 5% được thể hiện tương ứng trên Hình 6 và Hình 7. Kết quả cho thấy, ở 28 ngày tuổi mẫu đối chứng có cường độ nén xấp xỉ 53 MPa, sau đó giảm mạnh xuống khoảng 12,4 MPa khi tỷ lệ bã cà phê thay thế cát tự nhiên lên đến 20%. Cũng tương tự đối với các mẫu ở 56 ngày tuổi, cường độ nén của mẫu đối chứng là 59,6 MPa và giảm

xuống còn 15,3 MPa khi hàm lượng bã cà phê thay thế cát tăng lên 20%. Về vận tốc truyền xung siêu âm, mẫu đối chứng ngâm trong dung dịch NaCl 5% đạt 4061 m/s ở 28 ngày tuổi và 4408 m/s ở 56 ngày tuổi. Khi tăng hàm lượng bã cà phê lên 20%, giá trị vận tốc truyền xung siêu âm giảm đáng kể, còn lần lượt khoảng 1990 m/s và 3042 m/s tương ứng ở 28 và 56 ngày tuổi. Có thể thấy, sự thay đổi cường độ nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu ngâm trong dung dịch NaCl 5% có sự tương đồng với các mẫu được ngâm trong nước và trong dung dịch Na₂SO₄ 5%, khi cường độ nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vừa đều tăng theo thời gian, nhưng giảm theo sự gia tăng của hàm lượng bã cà phê trong thành phần cấp phối. Tương tự như các mẫu vừa ngâm trong nước và dung dịch muối sunfat, mối quan hệ giữa cường độ chịu nén với hàm lượng bã cà phê và giá trị vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vừa ngâm trong dung dịch NaCl 5% ở 28 và 56 ngày tuổi được thể hiện thông qua phương trình (5) và (6) tương ứng như sau:

$$f'_c = 75.48 - 2.52x - 5.62y \quad \text{với } R^2 = 0.999 \quad (5)$$

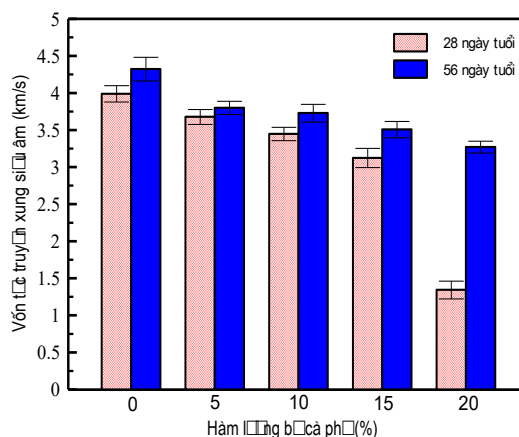
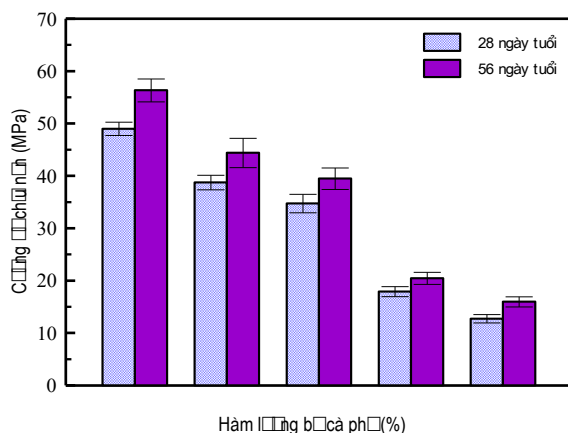
$$f'_c = 83.62 - 2.48x - 5.45y \quad \text{với } R^2 = 0.998 \quad (6)$$

3.4. Các mẫu vừa ngâm trong dung dịch hỗn hợp 5% Na₂SO₄ và 5% NaCl

Hình 8 và Hình 9 thể hiện cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vừa ngâm trong dung dịch hỗn hợp Na₂SO₄ 5% và NaCl 5% ở 28 và 56 ngày tuổi. Cũng tương tự như các mẫu vừa ngâm trong nước, ngâm trong dung dịch Na₂SO₄ 5% và ngâm trong dung dịch NaCl 5%, có thể thấy cường độ chịu nén cũng như vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vừa ngâm trong dung dịch hỗn hợp Na₂SO₄ 5% và NaCl 5% có xu hướng tăng theo thời gian với cùng hàm lượng bã cà phê thay thế cát, và giảm theo sự gia tăng của hàm lượng bã cà phê trong thành phần cấp phối. Mối quan hệ giữa cường độ chịu nén với hàm lượng bã cà phê và giá trị vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vừa ngâm trong dung dịch hỗn hợp Na₂SO₄ 5% và NaCl 5% ở 28 và 56 ngày tuổi được thể hiện thông qua phương trình (7) và (8) tương ứng như sau:

$$f'_c = 67.92 - 2.41x - 4.69y \quad \text{với } R^2 = 0.997 \quad (7)$$

$$f'_c = 76.88 - 2.48x - 4.72y \quad \text{với } R^2 = 0.998 \quad (8)$$



Hình 8. Cường độ chịu nén của các mẫu vữa ngâm trong hỗn hợp dung dịch Na_2SO_4 và NaCl

Hình 9. Vận tốc truyền xung siêu âm của các mẫu vữa ngâm trong hỗn hợp dung dịch Na_2SO_4 và NaCl

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm này được thực hiện nhằm thiết lập mối tương quan giữa cường độ chịu nén với vận tốc truyền xung siêu âm và hàm lượng bã cà phê trong vữa khi sử dụng bã cà phê thay thế một phần cát tự nhiên dưới các điều kiện môi trường xâm thực khác nhau. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng tới việc dự đoán cường độ chịu nén của mẫu vữa chứa bã cà phê thông qua hàm lượng bã cà phê trong thành phần cấp phối và vận tốc truyền xung siêu âm được xác định thông qua thí nghiệm không phá hủy. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra các kết luận chính sau:

Cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm đều có xu hướng tăng theo thời gian. Tuy nhiên khi tăng tỷ lệ bã cà phê thay thế cát trong thành phần cấp phối, cả hai đại lượng này đều giảm.

Cường độ chịu nén và vận tốc truyền xung siêu âm có mối quan hệ tuyến tính với hàm lượng bã cà phê.

Các phương trình dự đoán cường độ chịu nén của các mẫu vữa ở 28 và 56 ngày tuổi được xây dựng dựa trên hàm lượng bã cà phê và giá trị vận tốc truyền xung siêu âm bằng phương pháp phân tích hồi quy thực nghiệm. Các phương trình này cho thấy mức độ phù hợp khá tốt với dữ liệu thực nghiệm và có thể được sử dụng để dự báo cường độ chịu nén của vữa trong các điều kiện môi trường xâm thực khác nhau. Tuy nhiên, các phương trình đề xuất chỉ có giá trị trong phạm vi nghiên cứu đã thực hiện, bao gồm: hàm lượng bã cà phê thay thế cát từ 0-20%; thành phần cấp phối và loại vật liệu sử dụng trong nghiên cứu; tuổi mẫu khảo sát là 28 và 56 ngày; và các điều kiện môi trường thí nghiệm gồm nước, dung dịch Na_2SO_4 5%, dung dịch NaCl 5% và dung dịch hỗn hợp Na_2SO_4 5%- NaCl 5%. Việc áp dụng các phương trình này cho các cấp phối khác, hàm lượng bã cà phê ngoài phạm vi khảo sát, tuổi mẫu khác hoặc các điều kiện môi trường khác cần được kiểm chứng thông qua các nghiên cứu bổ sung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hegnsholt, E., Unnikrishnan, S., Pollmann-Larsen, M., Askelsdottir, B., Gerard, M. *Tackling the 1.6-Billion-Ton Food Loss and Waste Crisis*, The Boston Consulting Group, Food Nation, State Green, 2018.
- [2] Massaro Sousa, L., Ferreira, M.C., “Spent Coffee Grounds as a Renewable Source of Energy: An Analysis of Bulk Powder Flowability”, *Particuology*, vol. 43, pp. 92-100, 2019. DOI:10.1016/j.partic.2018.06.002
- [3] Roychand, R., Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., Zhang, G., Li, C.Q., “Transforming Spent Coffee Grounds into a Valuable Resource for the Enhancement of Concrete Strength”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 427, 139246, 2023. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.138205

- [4] Guendouz, M., Boukhelkhal, D., Triki, Z., Mechantel, A., Boukerma, T., “Effect of Using Spent Coffee Grounds Wastes as Aggregates on Physical and Thermal Properties of Sand Concrete”, *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 9(3):3256-3264, 2023.
- [5] Lachheb, A., Allouhi, A., El Marhoune, M., Saadani, R., Kousksou, T., Jamil, A., Rahmoune, M., Oussouaddi, O., “Thermal Insulation Improvement in Construction Materials by Adding Spent Coffee Grounds: An Experimental and Simulation Study”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 1411-1419, 2019. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.11.140
- [6] Lee, J., Song, H., Park, J., Lee, S., “Recycling Spent Coffee Grounds on Permeable Interlocking Concrete Paving Block”, *Advances in Environmental and Engineering Research*, 4(4):046, 2023. DOI:10.21926/aeer.2304046
- [7] Bogas, J.A., Gomes, M.G., Gomes, A., “Compressive Strength Evaluation of Structural Lightweight Concrete by Non-Destructive Ultrasonic Pulse Velocity Method”, *Ultrasonics*, 53(5):962-972, 2013. DOI:10.1016/j.ultras.2012.12.012
- [8] Kewalramani, M.A., Gupta, R., “Concrete Compressive Strength Prediction Using Ultrasonic Pulse Velocity through Artificial Neural Networks”, *Automation in Construction*, 15(3):374-379, 2006. DOI:10.1016/j.autcon.2005.07.003
- [9] Solís-Carcano, R., Moreno, E.I., “Evaluation of Concrete Made with Crushed Limestone Aggregate Based on Ultrasonic Pulse Velocity”, *Construction and Building Materials*, 22(6):1225-1231, 2008. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.01.014
- [10] ASTM C1437. *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [11] ASTM C597. *Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [12] ASTM C349. *Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (Using portions of prisms broken in flexure)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018.

Tuyên bố về xung đột lợi ích: Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Thông tin tài trợ (nếu có): Nghiên cứu này không nhận được tài trợ từ bên ngoài.