VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Đánh giá sự cân bằng giữa tính năng công tác, cơ học và khả năng kháng xâm nhập ion chloride của bê tông hạt mịn phối hợp tro bay và sợi xơ dừa

Nguyễn Hoàng Duy Linh[1], Nguyễn Tấn Khoa[2*], Ngô Văn Thức[1]

[1] Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

[2] Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng

TỪ KHOÁ

Bê tông hạt mịn
Tro bay
Sợi xơ dừa
Điện trở suất bề mặt
Độ thấm thâm nhập ion chloride

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ tro bay (TB, 0–40% xi măng) và hàm lượng sợi xơ dừa (SD, 0–2,5% theo khối lượng chất kết dính) đến tính chất tươi, cơ học và khả năng kháng ion chloride của bê tông hạt mịn (BTHM). Kết quả cho thấy tăng hàm lượng SD từ 0 đến 2,5% làm giảm độ sụt từ 18 xuống 8 cm và khối lượng thể tích tươi giảm 7,4%. Ngược lại, sử dụng TB cho thấy sự cải thiện tính công tác, với độ sụt đạt 14 cm tại 40% TB. Ở 56 ngày, BTHM với 30% TB khi tăng hàm lượng SD từ 0-2,5%, cường độ kéo uốn (Rku) tăng đến 19,2%, đạt 7,13 MPa, trong khi cường độ chịu nén (Rn) đạt 42,1–42,5 MPa với hàm lượng 1,5–2% SD. Trong hệ BTHM chứa 2%SD, việc tăng tỷ lệ TB từ 0-40% làm điện trở suất bề mặt (ESR) tăng 125,5% lên 47,1 kΩ.cm và QRCPT giảm 85,1% xuống 339 C ở 56 ngày, tương ứng mức thấm chloride từ "Trung bình" đến "Rất thấp". Quan hệ hàm mũ giữa ESR và QRCPT với hệ số xác định R2 = 0,936 cho thấy tiềm năng sử dụng ESR như chỉ số không phá hủy để đánh giá nhanh khả năng kháng chloride. BTHM với miền sử dụng 30% TB và 1,5–2% SD được xác định là vùng cấp phối cân bằng, dung hòa tính công tác, tính chất cơ học và khả năng kháng xâm nhập ion chloride.

KEYWORDS

Fine-grained concrete
Fly ash
Sợi coconut fiber
Electrical surface resistivity
Chloride ion penetration

ABSTRACT

This study investigates the effects of fly ash (FA) replacement (0–40% of cement) and coconut fiber (CF) content (0–2.5% by binder mass) on the fresh and mechanical properties and resistance to chloride ion penetration of fine-grained concrete (FGC). Increasing the CF content from 0% to 2.5% reduced the slump from 18 to 8 cm and decreased the fresh density by 7.4%. In contrast, FA incorporation improved workability, with the slump reaching 14 cm at 40% FA replacement. At 56 days, FGC containing 30% FA, increasing the CF content from 0% to 2.5% increased the flexural strength by up to 19.2%, reaching 7.13 MPa, while the compressive strength remained in the range of 42.1–42.5 MPa at CF contents of 1.5–2.0%. For FGC mixtures containing 2% CF, increasing the FA replacement level from 0% to 40% increased the electrical surface resistivity (ESR) by 125.5%, reaching 47.1 kΩ.cm, and reduced the RCPT charge passed (Q_RCPT) by 85.1%, to 339 C, at 56 days. These changes corresponded to a reduction in chloride ion penetrability from "Moderate" to "Very Low." An exponential relationship between ESR and QRCPT, with a coefficient of determination R^2 of 0.936, indicates the potential of ESR as a non-destructive indicator for rapid assessment of resistance to chloride ion penetration. Overall, FGC mixtures incorporating 30% FA and 1.5–2.0% CF exhibited a balanced combination of workability, mechanical properties, and chloride ion penetration resistance.

1. Giới thiệu

Ngành công nghiệp sản xuất xi măng truyền thống phục vụ cho nhu cầu xây dựng hiện nay đang đối mặt với những thách thức rất lớn về môi trường do phát thải lượng CO_2 gây hiệu ứng nhà kính rất lớn. Việc sản xuất 1 tấn xi măng Portland thường phát thải khoảng 0,7–1 tấn CO_2, tùy thuộc vào hàm lượng clinker, hiệu suất năng lượng và công nghệ sản xuất [1]. Trước yêu cầu cấp bách về mục tiêu NetZero vào năm 2050 và định hướng phát triển bền vững, việc ứng dụng các nguồn phế thải rắn công nghiệp như tro bay, xỉ lò cao, silica fume hay các phụ phẩm nông nghiệp sẵn có tại địa phương như tro trấu, các loại sợi hữu cơ để chế tạo, tăng cường tính chất cho các dòng bê tông xanh đang trở thành giải pháp rất tiềm năng và có tính hiệu quả cao.

BTHM sử dụng cốt liệu cát, đá với đường kính hạt $D_{max} \leq 10$ mm được ứng dụng phổ biến trong chế tạo cấu kiện dạng tấm mỏng, cấu kiện thanh mảnh, đúc sẵn, cấu kiện trang trí nhờ khả năng tạo bề mặt nhẵn mịn và độ đồng nhất cao. Tuy nhiên, loại vật liệu này thường co ngót lớn hơn bê tông thường và dễ xuất hiện các vết nứt tế vi do nhu cầu nước cao và hàm lượng hạt mịn lớn [2]. Nhằm hạn chế sự lan truyền vết nứt kéo và tăng độ dẻo dai cho BTHM, việc bổ sung sợi sinh

*Liên hệ tác giả: ntkhoa@ute.udn.vn
Nhận ngày 14/09/2026, sửa xong ngày 03/10/2026, chấp nhận đăng ngày 05/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1501

học gia cường là một trong các giải pháp thường được sử dụng. Trong đó, Sợi xơ dừa (SD) là một phụ phẩm nông nghiệp, dồi dào ở Việt Nam đặc biệt là khu vực Đồng bằng Sông Cửu Long. SD sở hữu độ bền và độ kéo uốn cao trong số các loại sợi tự nhiên [3, 4], giúp kháng nứt vượt trội và chuyển hóa phá hoại từ giòn sang dẻo dai nhờ hiệu ứng "bắc cầu" liên kết các khe nứt [5]. Bên cạnh đó, nguồn nguyên liệu sinh học này có giá thành rẻ, sẵn có tại địa phương, có lượng phát thải carbon cực thấp [4, 5]. Mặc dù vậy, SD thô tự nhiên chưa qua xử lý hóa học có cấu trúc hữu cơ rỗng xốp, dễ bị phân huỷ theo thời gian, độ hút nước bão hòa rất cao và có đặc tính ưa nước [6]. Các nhược điểm vật lý này làm suy giảm mạnh tính công tác dẻo của hỗn hợp tươi, đồng thời gia tăng độ rỗng mao dẫn tại vùng chuyển tiếp pha (ITZ) bao quanh thân SD [7], do đó thường được xử lý bề mặt bằng các phương pháp vật lý, hoá học để giảm khả năng bị phân huỷ và tăng cường khả năng liên kết của sợi với bê tông [8]. Tro bay- phụ phẩm công nghiệp của nhà máy nhiệt điện thường được sử dụng để thay thế một phần xi măng giúp cải thiện tính công tác và một số tính chất đóng rắn khác của bê tông và hiệu quả về môi trường [9, 10]. Hiệu quả độc lập hay phối hợp của TB và SD đã được ghi nhận qua nhiều nghiên cứu thực nghiệm được công bố gần đây. Nguyễn Văn Chính và Đặng Văn Mến (2019) tiến hành nghiên cứu thay thế xi măng bằng TB nhiệt điện Duyên Hải từ 0 % đến 40 % ở tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) = 0,3 và khuyến nghị tỷ lệ thay thế 20 % TB giúp cải thiện tối ưu đồng thời cường độ chịu nén và cấp chống thấm nước của bê tông sau 28 ngày tuổi [11]. Trần Mạnh Tiến và Đỗ Ngọc Tú (2024) khảo sát cường độ chịu nén và uốn của bê tông hạt nhỏ cốt sợi xơ dừa với hàm lượng 1 %, 1,5 % và 2 % theo khối lượng xi măng, nghiên cứu ghi nhận cường độ chịu nén trung bình đạt 40 MPa, cường độ chịu uốn đạt 8–12 MPa, mô đun đàn hồi xấp xỉ 30 GPa, và chỉ ra rằng hàm lượng sợi 1,5 % là phù hợp nhất để sản xuất tấm bê tông đúc sẵn [8]. Nghiên cứu của Nguyễn Thế Anh và Lê Nguyễn Phú Trưởng (2021) khi đánh giá các loại sợi tự nhiên vùng Đồng bằng sông Cửu Long cho thấy, đối với bê tông M30, việc bổ sung SD thô làm giảm cường độ chịu nén tuổi sớm nhưng làm tăng đáng kể cường độ kéo uốn, trong đó hàm lượng SD khuyên dùng dao động từ 2 % đến 4 % cho hiệu quả kéo uốn vượt trội hơn so với sợi rơm và sợi lục bình [12].

Sự kết hợp tương hỗ giữa TB và sợi gia cường trong bê tông cũng đã cho thấy một số kết quả đáng chú ý. Khan và Ali (2019) chứng minh rằng việc kết hợp 10 % TB trong bê tông cốt SD là tỷ lệ tối ưu giúp cải thiện cường độ chịu uốn và độ dẻo dai lên tới 95 % [4]. Lê Nguyễn Thiện Huy và Võ Nhật Luân (2025) chế tạo bê tông thân thiện môi trường sử dụng 25 % TB nhiệt điện Duyên Hải kết hợp 2 % SD đạt cường độ chịu uốn 28 ngày từ 34,5 MPa đến 50,5 MPa, cường độ kéo uốn đạt đến 8,2 MPa và độ hút nước thấp hơn 7,5 % [6]. Trong một hướng tiếp cận khác, Lê Anh Thắng và Tô Minh Đoàn (2024) khảo sát bê tông cường độ cao sử dụng cát mịn cửa sông lọt sàng 0,63 mm kết hợp TB và 2 % sợi polypropylene cho cường độ chịu uốn đạt 64,39 MPa, cường độ kéo uốn đạt 8,3 MPa và đáp ứng tốt các chỉ tiêu bê tông tự lèn [13].

Mặc dù đã có các nghiên cứu về bê tông sử dụng TB và SD, việc khảo sát có hệ thống trên dải hàm lượng rộng TB (0–40 %) và SD (0–2,5 %) để xác định miền cấp phối cân bằng giữa tính năng cơ học và độ bền vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, ảnh hưởng đồng thời của TB và SD đến tính năng cơ học và độ bền lâu của BTHM chưa được làm rõ. SD có thể cải thiện khả năng kháng nứt nhưng làm gia tăng độ rỗng và vận chuyển nước, trong khi TB có thể bù đắp bất lợi này nhờ phản ứng pozzolan và đặc chắc hóa cấu trúc. Do đó, cần xác định hàm lượng TB–SD thích hợp nhằm cân bằng tính công tác, khả năng chịu lực và khả năng kháng xâm nhập ion chloride.

Nghiên cứu này khảo sát có hệ thống BTHM sử dụng cát hạt mịn kết hợp đá mi bụi, với TB thay thế 0–40 % CKD và SD bổ sung 0–2,5 % CKD. Ảnh hưởng của hai thành phần được đánh giá thông qua tính chất hỗn hợp tươi, tính năng cơ học và khả năng kháng xâm nhập ion chloride ở 7, 28 và 56 ngày. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác định miền cấp phối đạt sự cân bằng giữa các nhóm tính năng, đồng thời phân tích mối quan hệ giữa ESR và QRCPT nhằm đánh giá khả năng sử dụng ESR như một chỉ tiêu nhanh cho khả năng kháng xâm nhập ion chloride, qua đó hỗ trợ lựa chọn cấp phối BTHM–TB–SD phù hợp với môi trường xâm thực.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu chế tạo

Nghiên cứu sử dụng xi măng PC40 Việt Nhật thỏa mãn theo TCVN 2682:2020, với khối lượng riêng 3,11 g/cm^3, độ mịn Blaine 3810 cm^2/g. Cường độ chịu nén 28 ngày đạt 54 MPa. Thành phần hoá học của xi măng được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hoá học của xi măng và tro bay.

Thành phần hoá học	Xi măng PC40 Việt Nhật	TB nhiệt điện Duyên Hải 1
SiO_2 (%)	20,2	56,1
Al_2O_3 (%)	5,1	21,2
Fe_2O_3 (%)	3,2	5,72
CaO (%)	63,5	1,7
LOI (%)	1,8	7,6

Bảng 2. Thành phần hạt của cốt liệu cho bê tông hạt mịn.

Cỡ sàng cát (mm)	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,075
Lượng sót tích luỹ của CS (%)	0	0	0,2	0,4	1,9	61,4	96,1	100
Lượng sót tích luỹ của ĐM (%)	0	19,5	57,3	74,9	85,0	94,8	100	100
Hỗn hợp Cốt liệu 60 % CS và 40 % ĐM (%)	0	7,8	23,0	30,2	35,1	74,8	97,6	100

Nghiên cứu sử dụng TB nhiệt điện Duyên Hải 1 với tỷ trọng 2,35 g/cm^3, Thành phần hoá của TB được trình bày trong Bảng 1, với tổng hàm lượng SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 83 % > 70 % thoả mãn yều cầu TB loại F theo TCVN 10302:2014.

Cát sông (CS) tự nhiên có khối lượng riêng 2,637 g/cm^3, mô đun độ lớn 1,6. Đá mi bụi (ĐM) với kích thước hạt D_{max} = 10 mm, khối lượng riêng 2,72 g/ cm^3. Thành phần hạt của cát sông và đá mi bụi được trình bày trong Bảng 2.

Phụ gia siêu dẻo Lotus 301D của hãng Lotus thoả mãn ASTM C494 Loại F được sử dụng trong nghiên cứu để giảm nước và tăng tính công tác cho bê tông.

Nghiên cứu sử dụng SD được xử lý qua dung dịch NaOH để giúp bám dính giảm hút nước và chống phân hủy trong bê tông. Sợi xơ tự nhiên được cắt nhỏ theo kích thước trong khoảng 1.5 cm – 2 cm. Sau đó đem rửa với nước sạch khoảng 2 đến 3 lần để loại bỏ bớt hàm lượng bụi trong sợi. Tiếp theo ngâm sợi trong dung dịch NaOH 5 % trong khoảng 2 ngày. Kết thúc thời gian ngâm vớt sợi lên, rửa lại nhiều lần với nước sạch và đem phơi khô. Các sợi sau khi xử lý có; khối lượng riêng 1,21g/cm^3; độ hút nước bão hòa sau 48 giờ đạt 99 %. Sợi dừa tự nhiên phơi khô được sử dụng trực tiếp cho bê tông.

2.2. Thành phần cấp phối thực nghiệm

Các cấp phối BTHM sử dụng TB và SD được thiết kế theo nguyên lý thể tích tuyệt đối. 8 thành phần cấp phối BTHM được thiết kế với tỷ lệ N/CKD = 0,4, tổng chất kết dính (CKD) là 525 kg/m^3, hàm lượng phụ gia siêu dẻo sử dụng 1 % theo khối lượng xi măng, cốt liệu sử dụng gồm cát sông tự nhiên và đá mi bụi với tỷ lệ 60:40 theo khối lượng. Tỷ lệ cát sông: đá mi bụi (60:40) được lựa chọn từ 5 cấp phối thử nghiệm với 5 tỷ lệ cát mịn: đá mi bụi khác nhau (70:30; 60:40; 50:50; 40:60:30:70) với kết quả độ sụt và cường độ 7 ngày tốt nhất, được sử dụng cho 8 cấp phối thiết kế.

Bảng 3. Thành phần cấp phối chi tiết cho các hỗn hợp bê tông hạt mịn thực nghiệm.

Ký hiệu cấp phối	Xi măng (kg/m^3)	TB (kg/m^3)	Nước (l/m^3)	CS (kg/m^3)	ĐM (kg/m^3)	SD (kg/m^3)	Phụ gia (l/m^3)	Tỷ lệ TB/CKD	Tỷ lệ SD/CKD
30TB-0SD	367,5	157,5	210	959,2	639,5	0	5,25	30 %	0,0 %
30TB-1SD	367,5	157,5	210	952,2	634,8	5,3	5,25	30 %	1 %
30TB-1,5SD	367,5	157,5	210	948,7	632,5	7,9	5,25	30 %	1,5 %
30TB-2SD	367,5	157,5	210	945,2	630,1	10,5	5,25	30 %	2 %
30TB-2,5SD	367,5	157,5	210	941,7	627,8	13,1	5,25	30 %	2,5 %
0TB-2SD	525	0	210	971,4	647,6	10,5	5,25	0 %	2 %
15TB-2SD	446,3	78,75	210	958,3	638,9	10,5	5,25	15 %	2 %
40TB-2SD	315	210	210	936,5	624,3	10,5	5,25	40 %	2 %

Tám cấp phối được thiết kế theo hai hệ khảo sát độc lập nhằm đánh giá riêng ảnh hưởng của hàm lượng SD và TB đến các tính chất tươi và đóng rắn của bê tông hạt mịn (BTHM). Ở Hệ 1, hàm lượng TB được cố định ở 30 % khối lượng CKD, trong khi SD thay đổi từ 0 %, 1 %, 1,5 %, 2 % đến 2,5 %, tương ứng với các cấp phối 30TB-0SD, 30TB-1SD, 30TB-1,5SD, 30TB-2SD và 30TB-2,5SD. Ở Hệ 2, hàm lượng SD được cố định ở 2 % CKD và tỷ lệ TB thay thế xi măng thay đổi từ 0 %, 15 %, 30 % đến 40 %, tương ứng với các cấp phối 0TB-2SD, 15TB-2SD, 30TB-2SD và 40TB-2SD. Trong đó, ký hiệu xTB-ySD lần lượt biểu thị tỷ lệ TB thay thế xi măng và hàm lượng SD bổ sung theo khối lượng CKD. Cấp phối 30TB-2SD là điểm giao chung và được sử dụng làm cấp phối đối chứng giữa hai hệ khảo sát. Thành phần chi tiết của tám cấp phối được trình bày trong Bảng 3, các kết quả thực nghiệm được phân nhóm theo hai hệ trên để làm rõ ảnh hưởng riêng của từng biến số.

2.3. Chế tạo mẫu và phương pháp thí nghiệm

Hỗn hợp bê tông được nhào trộn bằng máy cưỡng bức trục ngang qua 3 giai đoạn: trộn khô cốt liệu với CKD trong 2 phút; rải từ từ SD đã tơi để phân tán ngẫu nhiên, chống vón cục trong 2 phút; và thêm dung dịch nước kèm phụ gia Lotus 301D để trộn ướt tốc độ cao trong 3 phút cho đến khi đạt hỗn hợp đạt độ dẻo đồng nhất.



Hình 1. Vật liệu chế tạo bê tông hạt mịn.



a) Thí nghiệm độ sụt b) Thí nghiệm cường độ kéo uốn

Hình 2. Thí nghiệm độ sụt và thí nghiệm cường độ kéo uốn của bê tông hạt mịn.

Ngay sau khi nhào trộn, độ sụt và khối lượng thể tích tươi của bê tông được xác định theo TCVN 3106:2022 và TCVN 3108:2022. Hỗn hợp tươi tiếp tục được đúc vào các khuôn thép tiêu chuẩn cho mỗi chỉ tiêu tại các mốc tuổi 7, 28 và 56 ngày gồm: mẫu lập phương 10x10x10 cm xác định cường độ chịu nén (R_n) theo TCVN 3118:2022; mẫu lăng trụ 10x10x40 cm xác định cường độ kéo uốn (R_{ku}) theo TCVN 3119:2022; mẫu hình trụ tròn kích thước 10x20 cm đo xung vận tốc siêu âm (UPV) theo ASTM C597 và điện trở suất bề mặt (ESR) theo AASHTO T358, sau đó cắt thành các đĩa trụ tròn đường kính 10 cm, chiều dày 5 cm để đo điện lượng thấm ion chloride (Q_{RCPT}) theo phương pháp đo thấm nhanh (RCPT) theo ASTM C1202; và mẫu tấm mỏng 10x10x4 cm xác định độ hút nước (ĐHN) theo TCVN 3113:2022.

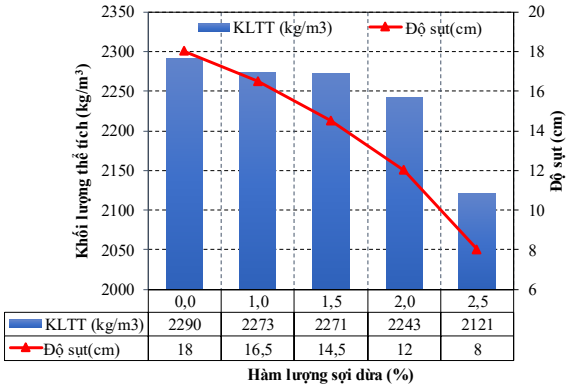
Tất cả mẫu thử được tháo khuôn sau 24 giờ và bảo dưỡng ngâm trong nước máy nhiệt độ không khí cho đến đúng ngày thí nghiệm. Mỗi chỉ tiêu thí nghiệm được thực hiện trên tối thiểu 03 mẫu lặp cho mỗi mốc tuổi.

3. Kết quả và thảo luận

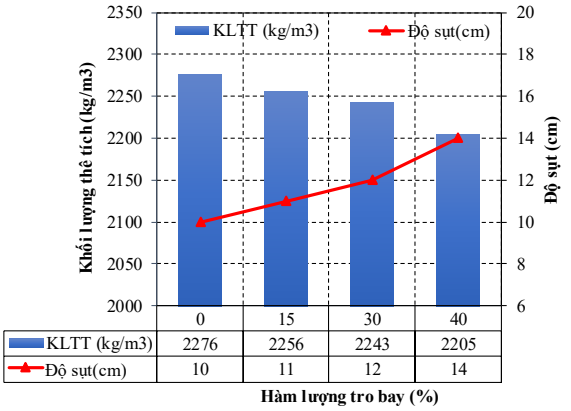
3.1. Độ sụt và khối lượng thể tích bê tông tươi

Kết quả thí nghiệm khối lượng thể tích tươi và độ sụt của các cấp phối BTHM được thể hiện ở Hình 3a, 3b.

Kết quả thí nghiệm ở Hình 3a cho thấy, ở BTHM chứa 30 % TB, khi hàm lượng SD tăng từ 0 % đến 2,5 %, độ sụt của hỗn hợp giảm từ 18 cm (30TB-0SD) xuống đến 8,0 cm (30TB-2,5SD), đồng thời khối lượng thể tích tươi giảm 7,4 % từ 2290 kg/m^3 xuống 2121 kg/m^3. Ngược lại, ở BTHM chứa 2 % SD, khi tăng tỷ lệ TB từ 0 % lên 40 %, độ sụt có xu hướng tăng từ 10 cm (0TB-2SD) lên 14,0 cm (40TB-2SD), trong khi khối lượng thể tích tươi chỉ giảm nhẹ 3,1 % từ 2276 kg/m^3 xuống 2205 kg/m^3. Có thể nhận thấy việc thay đổi tỷ lệ SD sử dụng ảnh hưởng khá mạnh đến sự thay đổi độ sụt và khối lượng thể tích của BTHM. Sự suy giảm tính công tác khi tăng tỷ lệ SD liên quan đến cấu trúc xốp và bản chất ưa nước của sợi tự nhiên, dẫn đến sự hấp thụ một phần nước tự do đóng vai trò bôi rơn trong hỗn hợp [6]. Đồng thời, độ nhám của sợi SD làm gia tăng lực cản ma sát giữa các hạt cốt liệu mịn, kết hợp với hiệu ứng đan xen mạng lưới sợi giữ chặt hỗn hợp dẻo tươi, cản trở chuyển động chảy của hỗn hợp [4]. Khối lượng thể tích tươi giảm được giải thích bởi tỷ trọng thấp của SD 1,21 g/cm^3 so với các vật liệu còn lại. Ngoài ra, việc tăng tỷ lệ sử dụng SD làm suy giảm tính công tác, gây cản trở quá trình đầm chặt cơ học, tạo nhiều bọt khí cuốn trong lòng hỗn hợp bê tông tươi góp phần làm giảm khối lượng thể tích của bê tông.



a)



b)

Hình 3. Khối lượng thể tích và độ sụt theo: (a) Hàm lượng SD ở BTHM chứa 30 % TB; (b) Tỷ lệ TB ở BTHM chứa 2 % SD.

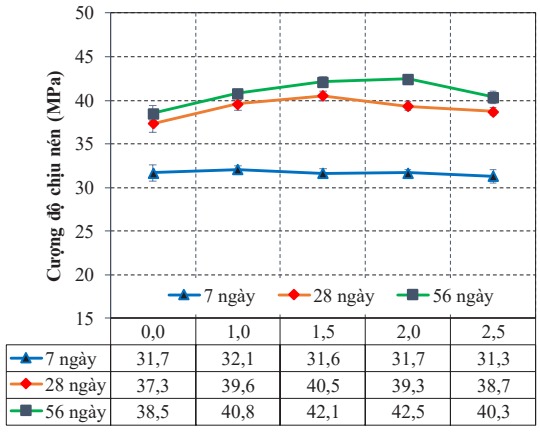
Đối với hệ khảo sát TB (chứa 2 % SD cố định) ở Hình 3b, kết quả việc tăng độ sụt khi tăng tỷ lệ TB thay thế xi măng là do hiệu ứng ổ bị từ các hạt TB hình cầu trơn nhẵn tạo ra [14]. Cơ chế này làm giảm lực ma sát trượt nội bộ giữa cát mịn và hồ xi măng tươi, đồng thời hỗ trợ giải phóng lượng nước bôi trơn bị mắc kẹt trong các cấu trúc vón tụ của hạt mịn [14]. Sự sụt giảm nhẹ khối lượng thể tích tươi của hệ chứa TB chủ yếu do chênh lệch tỷ trọng giữa TB Duyên Hải 1 (2,35 g/cm^3) và xi măng (3,11g/cm^3) khi thay thế khối lượng.

3.2. Cường độ chịu nén và cường độ kéo uốn

Kết quả thí nghiệm R_n và R_{ku} ở 7, 28, 56 ngày của các cấp phối BTHM được thể hiện ở tương ứng ở Hình 4a, 4b và Hình 5a, 5b.

Kết quả R_n và R_{ku} của tất cả các cấp phối đều tăng liên tục theo thời gian bảo dưỡng từ 7 ngày đến 56 ngày. Điều này là do các sản phẩm hydrat hóa của hồ xi măng tiếp tục được hình thành trong quá

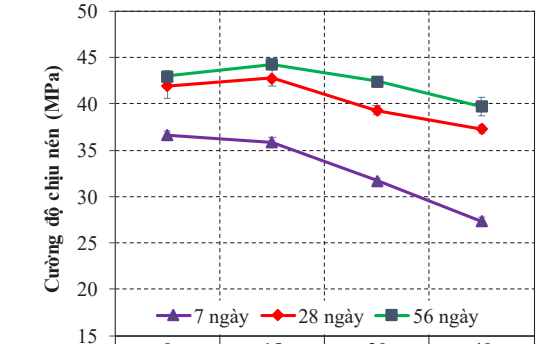
trình dưỡng hộ, làm lấp đầy cấu trúc lỗ rỗng của hồ xi măng và qua đó cải thiện các tính chất cường độ [10].



	0,0	1,0	1,5	2,0	2,5
7 ngày	31,7	32,1	31,6	31,7	31,3
28 ngày	37,3	39,6	40,5	39,3	38,7
56 ngày	38,5	40,8	42,1	42,5	40,3

Hàm lượng sợi (%)

a)

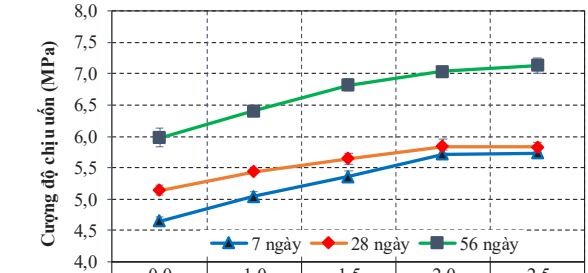


	0	15	30	40
7 ngày	36,6	35,9	31,7	27,3
28 ngày	41,9	42,8	39,3	37,3
56 ngày	43,0	44,3	42,5	39,7

Hàm lượng tro bay (%)

b)

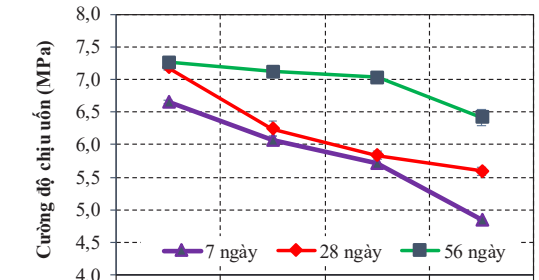
Hình 4. Cường độ chịu nén theo: (a) Hàm lượng SD ở BTHM chứa 30 % TB; (b) Tỷ lệ TB ở BTHM chứa 2 % SD.



	0,0	1,0	1,5	2,0	2,5
7 ngày	4,65	5,05	5,36	5,72	5,74
28 ngày	5,14	5,44	5,65	5,84	5,83
56 ngày	5,98	6,40	6,81	7,03	7,13

Hàm lượng sợi (%)

a)



	0	15	30	40
7 ngày	6,65	6,06	5,72	4,84
28 ngày	7,18	6,25	5,84	5,59
56 ngày	7,26	7,12	7,03	6,42

Hàm lượng tro bay (%)

b)

Hình 5. Cường độ chịu uốn theo: (a) Hàm lượng SD ở BTHM chứa 30 % TB; (b) Tỷ lệ TB ở BTHM chứa 2 % SD.

Ở BTHM chứa 30 % TB, khi thay đổi hàm lượng SD từ 0 đến 2,5 %, Hình 4a cho thấy R_n tại 7 ngày ít thay đổi, dao động trong khoảng 31,3–32,1 MPa giữa các cấp phối 30TB-0SD đến 30TB-2,5SD. Kết quả này có thể là do ở tuổi sớm bê tông TB thuỷ hoá chậm, chưa tạo liên kết chặt chẽ với SD và SD có bản chất xốp nhẹ cũng không tham gia chịu lực nén cơ học nên mức độ ảnh hưởng của SD đến Rn của bê tông không nhiều [12]. Ở 28 ngày, R_n tăng khi hàm lượng SD tăng đến 1,5 %, đạt 40,5 MPa, cao hơn 8,6 % so với cấp phối không SD 30TB-0SD (37,3 MPa), sau đó giảm nhẹ xuống 38,7 MPa tại 2,5 % SD. Đến 56 ngày, R_n của các cấp phối 1,5 % và 2 % SD đạt lần lượt 42,1 và 42,5 MPa, trong khi giảm xuống 40,3 MPa tại 2,5 % SD. Nhìn chung, ảnh hưởng của SD đến R_n rõ hơn ở 28 và 56 ngày, với hàm lượng 1,5–2 % cho cường độ cao nhất trong phạm vi khảo sát. Kết quả này có thể là do ở mốc tuổi muộn (28,56 ngày) phản ứng pozzolanic sinh gel C-S-H thứ cấp bồi đắp mao quản kẽ rỗng và thắt chặt vùng ITZ bao quanh gốc sợi [6, 15], làm tăng cường lực dính bám ma sát cơ học giúp kích hoạt tối đa hiệu ứng "bắc cầu" chống nở hông dưới tác dụng của ứng suất Poisson dọc trục, nâng cường độ đạt đỉnh tại dải hàm lượng 1,5 %–2 % sợi. Tuy nhiên, khi vượt quá mốc 2 % SD, độ sụt giảm rõ rệt như đã phân tích ở mục 3.1, làm hỗn hợp bê tông khó đầm cơ học, cuốn khí nhiều và khả năng phát sinh nhiều khuyết tật cục bộ do SD gây ra hơn từ đó làm giảm độ đặc chắc vi cấu trúc, làm giảm cường độ chịu nén [5, 14]. Xu hướng này phù hợp với kết quả của Trần Mạnh Tiến và cộng sự (2024) và J. Ahmad và cộng sự (2022)[7, 8], qua đó cho thấy việc gia tăng hàm lượng sợi có tác dụng trong một khoảng tối ưu trước khi tác động bất lợi đến tính công tác, độ đặc chắc và cường độ của bê tông.

Ở BTHM chứa 2 % SD, khi tăng tỷ lệ TB từ 0 đến 40 %, kết quả ở Hình 4b cho thấy R_n tại 7 ngày có xu hướng giảm. Ở 28 và 56 ngày, R_n có xu hướng tăng đến mức 15 % TB rồi giảm khi tỷ lệ TB tăng lên 30–40 %. So với BTHM không TB, R_n tại 28 ngày của các cấp phối 15 %, 30 % và 40 % TB lần lượt đạt 102,1 %, 93,8 % và 89,0 %; các giá trị tương ứng ở 56 ngày là 103 %, 98,8 % và 92,3 %. Kết quả này cũng cho thấy BTHM sử dụng TB có xu hướng phát triển cường độ tốt hơn ở các

tuổi muộn về sau. BTHM 30 % TB (30TB-2SD) có cường độ chịu nén 56 ngày đạt gần tương đương so với BTHM không TB (0TB-2SD). Kết quả này có thể được giải thích là do ở tuổi 7 ngày, TB tạo hiệu ứng pha loãng clinker và có tốc độ thủy hóa chậm ở tuổi sớm của pozzolan làm giảm cường độ chịu nén của bê tông [10]. Đến 28–56 ngày, phản ứng pozzolanic của TB tạo C-S-H thứ cấp, tinh chỉnh lỗ rỗng và tăng cường ITZ quanh SD, qua đó cải thiện hiệu ứng "bắc cầu", chống nở hông dọc trục giúp tăng cường độ chịu nén và đạt cao nhất tại 15 % TB [5, 7]. Tuy nhiên, việc tăng TB vượt mức 30 % khiến clinker sụt giảm sâu, lượng $Ca(OH)_2$ không đủ kích hoạt khiến TB dư thừa đóng vai trò hạt độn cơ học kém liên kết làm giảm cường độ chịu nén [3].

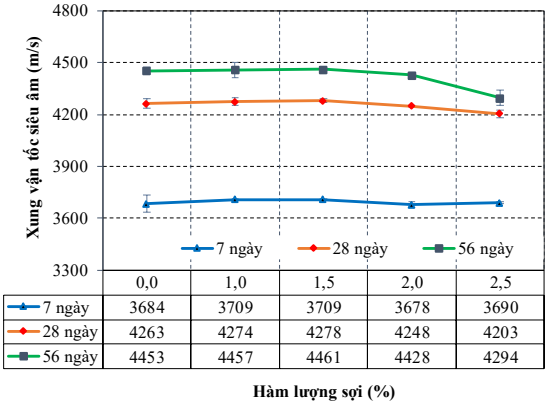
Ở BTHM chứa 30 % TB, khi thay đổi hàm lượng SD từ 0 đến 2,5 %, kết quả Hình 5a cho thấy khi tăng tỷ lệ SD từ 0 đến 2,5 %, cường độ chịu uốn ở 7, 28, 56 ngày có tăng đều từ 0 % đến 2 % SD, và gần xấp xỉ với mức 2,5 % SD. Ở 28 ngày, Cấp phối 2 % SD (30TB-2SD) và 2,5 % SD (30TB-2,5SD) đạt tương ứng 5,84 MPa, 5,83 MPa tăng tương ứng 13,5 % và 13,3 % so với cấp phối 0 % SD (30TB-0SD). Ở 56 ngày Tỷ lệ tăng của 2 % SD và 2,5 % SD tương ứng 17,5 % và 19,2 %. Cơ chế làm tăng cường độ chịu uốn của BTHM sử dụng SD là do SD phân tán đa hướng giúp trì hoãn sự lan vết nứt ở vùng kéo thông qua hiệu ứng "bắc cầu" căng ngang vết nước dọc và khả năng hấp thụ năng lượng lớn nhờ độ giãn dài cao của SD [5, 6]. Đồng thời, độ nhám bề mặt sợi kết hợp với gel C-S-H từ phản ứng pozzolanic giúp thắt chặt vùng ITZ, tăng cường lực ma sát và độ dính bám kháng rút sợi [3]. Điều này lý giải việc cường độ chịu uốn tăng khi tăng hàm lượng SD lên đến 2 %. Tuy nhiên khi hàm lượng SD tăng mật độ quá cao (2,5 %), SD trong bê tông có xu hướng xoắn, rối và vón cục thành các búi sợi, làm giảm khả năng phân tán đồng đều và hạn chế sự thâm nhập của hồ xi măng vào giữa các sợi [7, 13]. Hiện tượng này làm suy yếu liên kết kết dính tại giao diện sợi–ma trận và giảm khả năng kháng kéo tuột của sợi [7, 16]. Do đó, khả năng truyền ứng suất và hiệu ứng bắc cầu vết nứt bị suy giảm, khiến cường độ kéo uốn có xu hướng chững lại hoặc giảm khi hàm lượng sợi tiếp tục tăng [7, 13].

Ở BTHM chứa 2 % SD, khi tăng tỷ lệ TB từ 0 đến 40 % kết quả ở Hình 5b cho thấy ở 7 ngày cường độ kéo uốn của cấp phối 0TB-2SD đạt 6,65 MPa, giảm 27,2 % xuống còn 4,84 MPa ở cấp phối 40TB-2SD. Sự sụt giảm này do phản ứng pozzolanic diễn ra chậm ở tuổi sớm của tro bay [3]. Ở 28 ngày mức độ phản ứng puzzolan của TB cũng bị giới hạn nên mức độ đóng góp vào sự phát triển cường độ chịu uốn chưa cao. Ngoài ra, các hạt TB với dạng hình cầu trơn nhẵn trong vi cấu trúc bê tông làm lực bám dính cơ học và lực khoá cơ lý giữa TB với hồ xi măng, cốt liệu xung quanh bị giảm đáng kể [4, 17]. Cơ chế này góp phần giải thích hiện tượng ở 28 ngày cường độ chịu uốn của BTHM sử dụng 15 % TB đạt kết quả thấp hơn BTHM không TB trong khi cường độ chịu nén lại cao hơn. Ở 28 ngày, cường độ chịu uốn của BTHM chứa 15–40 % TB đạt 77,8–86,1 % so với BTHM không TB, nhưng tăng lên 87,7–97,2 % ở 56 ngày, cho thấy sự đóng góp rõ hơn của phản ứng pozzolanic của TB ở tuổi muộn.

Với cấp phối BTHM không sợi (30TB-0SD), tỷ số cường độ kéo uốn/cường độ chịu nén (R_{ku}/ R_n) của mẫu không sợi đạt khoảng 12,03 %–13,58 %, cao hơn so với mức 10 %–12 % thông thường của bê tông đá dăm thường [10]. Khi gia cường SD, tỷ số này tiếp tục được nâng cao lên ngưỡng 14,8 %–15,8 % như ở các cấp phối 0TB-2SD và 30TB-2,5SD. Xu hướng này phù hợp với kết quả của Trần Mạnh Tiến và cộng sự (2024) [8].

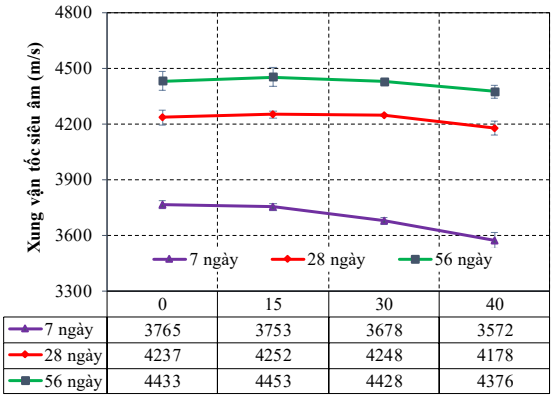
3.3. Xung vận tốc siêu âm

Kết quả xung vận tốc siêu âm (UPV) của BTHM được thể hiện ở Hình 6 (a, b).



	0,0	1,0	1,5	2,0	2,5
7 ngày	3684	3709	3709	3678	3690
28 ngày	4263	4274	4278	4248	4203
56 ngày	4453	4457	4461	4428	4294

a)



	0	15	30	40
7 ngày	3765	3753	3678	3572
28 ngày	4237	4252	4248	4178
56 ngày	4433	4453	4428	4376

b)

Hình 6. Xung vận tốc siêu âm theo: (a) Hàm lượng SD ở BTHM chứa 30 % TB; (b) Tỷ lệ TB ở BTHM chứa 2 % SD.

Kết quả nghiên cứu ở Hình 6 cho thấy các cấp phối đều ghi nhận xu hướng tăng trưởng UPV liên tục từ 7 đến 56 ngày. Theo tiêu chuẩn phân loại chất lượng bê tông bằng phương pháp không phá hủy của Whitehurst (1951)[18], tất cả các cấp phối thí nghiệm ở 28, 56 ngày đạt từ 4178 đến 4457 m/s nằm trong dải phân loại bê tông chất lượng "Tốt" (3500–4500 m/s).

Hình 6a thể hiện UPV của BTHM theo hàm lượng SD trong hệ chứa 30 % TB theo tuổi dưỡng hộ. Ở 7 ngày, UPV của các cấp phối 0–1,5 % SD tương đối ổn định, sau đó giảm nhẹ tại 2–2,5 % SD. Xu hướng

này tương tự ở 28 và 56 ngày, nhưng mức suy giảm tại hàm lượng cao rõ rệt hơn. Ở 56 ngày, UPV đạt cực đại tại 1,5 % SD (4461 m/s), trong khi 0 % và 2,5 % SD lần lượt đạt 4453 và 4294 m/s, tương đương 99,8 % và 96,3 % giá trị cực đại. Đáng chú ý, UPV ở 28 và 56 ngày không hoàn toàn đồng nhất với xu hướng phát triển R_n. Trong khi R_n đạt cực đại trong khoảng 1,5–2 % SD, với giá trị 42,5 MPa tại 2 % SD ở 56 ngày, UPV chỉ tăng nhẹ và gần như không đổi đến 1,5 % SD, sau đó giảm tại 2 % SD (4428 m/s) và 2,5 %SD (4294 m/s). Sự chênh lệch xu hướng giữa R_n và UPV xuất phát từ bản chất vật lý đo lường. Trị số R_n được chi phối bởi mật độ gel CKD đặc chắc và hiệu ứng "bắc cầu" giữ chặt ma trận chống nở hông của sợi [8]. Ngược lại, UPV đặc trưng cho tính liên tục cấu trúc và đặc biệt biến đổi với sự gián đoạn môi trường [7]. Do SD thô có độ rỗng tự nhiên cao [5], hàm lượng sợi lớn có thể làm gia tăng độ rỗng và khoảng hở co ngót tại vùng ITZ, tạo ra các vi khuyết tật gây tán xạ, khúc xạ sóng siêu âm làm sụt giảm UPV [6, 7]. Vì vậy, UPV có thể suy giảm rõ từ khoảng 2 % SD, trong khi R_n vẫn được duy trì, cải thiện nhờ hiệu ứng gia cường của sợi; nhưng đến 2,5 % SD, sự gia tăng khuyết tật cấu trúc đủ lớn để làm suy giảm đồng thời cả UPV và R_n.

Ở nhóm BTHM với 2 % SD và thay đổi hàm lượng TB, kết quả ở Hình 6b cho thấy UPV tuổi 7 ngày giảm theo hàm lượng TB do hiệu ứng pha loãng clinker và tốc độ thủy hóa sớm chậm [11]. Đến mốc 28–56 ngày, UPV đạt cao nhất với tỷ lệ 15 % TB (4252, 4452 m/s), hỗn hợp 30TB-2SD đạt giá trị tương đương trong khi hỗn hợp 40TB-2SD vẫn thấp hơn hỗn hợp 0TB-2SD. Xu hướng phát triển UPV có sự tương đồng so với sự phát triển của Rn và được giải thích do phản ứng pozzolanic và hiệu ứng pha loảng của tro bay đã phân tích ở mục 3.2.

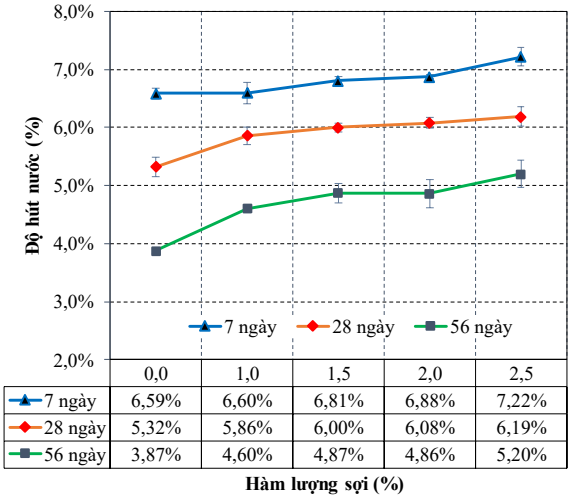
3.4. Độ hút nước

Kết quả thí nghiệm độ hút nước của BTHM theo hàm lượng SD, tỷ lệ TB và ngày tuổi dưỡng hộ (7, 28 và 56 ngày) được thể hiện ở Hình 7.

Kết quả thí nghiệm cho thấy độ hút nước của các cấp phối đều có xu hướng giảm theo thời gian dưỡng hộ. Cấp phối đối chứng 30TB-0SD giảm từ 6,59 % ở 7 ngày xuống còn 3,87 % ở 56 ngày; cấp phối 30TB-2SD giảm từ 6,88 % xuống 4,86 % ở mốc tuổi tương ứng.

Ở BTHM chứa 30 % TB (Hình 7a), khi hàm lượng SD tăng từ 0 % đến 2,5 % thì ĐHN đều có xu hướng tăng ở mọi mốc tuổi tuổi dưỡng hộ; tại mốc 56 ngày, ĐHN tăng từ 3,87 % (30TB-0SD) lên 5,20 % (30TB-2,5SD), tương ứng mức tăng 34,3 %. Sự gia tăng này là do bản chất hữu cơ xốp rỗng và tính ưa nước của SD tự nhiên và sự hình thành khoảng hở do co ngót quanh thân sợi trong quá trình đóng rắn tạo mạng lưới mao dẫn liên thông thúc đẩy nước thẩm thấu sâu vào bê tông [4, 5, 7, 19, 20]. Sự gia tăng độ hút nước và suy giảm UPV ở cấp phối 30TB-2.5SD đã phản ánh được trạng thái hỗn hợp tươi ở Mục 3.1, khi tính công tác suy giảm mạnh gây cản trở quá trình đầm chặt có thể gia tăng vi khuyết tật cho bê tông.

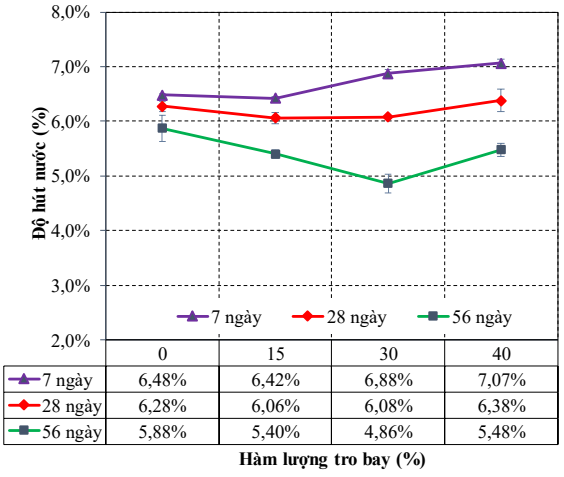
Ở BTHM chứa 2 % SD, khi tỷ lệ TB tăng từ 0 % đến 40 %, ở 7 ngày kết quả Hình 7b cho thấy TB chưa thể hiện rõ hiệu quả việc giảm ĐHN; 15 % TB cho giá trị thấp nhất (6,42 %), trong khi hàm lượng 30–40 % làm ĐHN tăng so với đối chứng. Đến 28 ngày, BTHM với 30 % TB cho kết quả ĐHN xấp xỉ với 15 % TB và đã thấp hơn đối chứng. Đến 56 ngày, hiệu quả của TB thể hiện rõ hơn, với tất cả cấp phối chứa TB đều có ĐHN thấp hơn mẫu đối chứng; trong đó 30 % TB đạt giá trị thấp nhất 4,87 %. Sự giảm độ hút nước theo thời gian của các cấp phối được giải thích do hiệu ứng lèn chặt và pozzolanic của tro bay trong bê tông [3]. Hiệu quả tối ưu ĐHN ở 28, 56 ngày tương ứng ở 30 % TB cho thấy sự cân bằng giữa phản ứng pozzolanic và hiệu ứng pha loãng; với tỷ lệ 40 % TB, hiệu ứng pha loãng tăng có khả năng làm chậm mức độ phản ứng pozzolanic [9], giảm mức độ độ đặc chắc của bê tông.



	0,0	1,0	1,5	2,0	2,5
7 ngày	6,59%	6,60%	6,81%	6,88%	7,22%
28 ngày	5,32%	5,86%	6,00%	6,08%	6,19%
56 ngày	3,87%	4,60%	4,87%	4,86%	5,20%

Hàm lượng sợi (%)

a)



	0	15	30	40
7 ngày	6,48%	6,42%	6,88%	7,07%
28 ngày	6,28%	6,06%	6,08%	6,38%
56 ngày	5,88%	5,40%	4,86%	5,48%

Hàm lượng tro bay (%)

b)

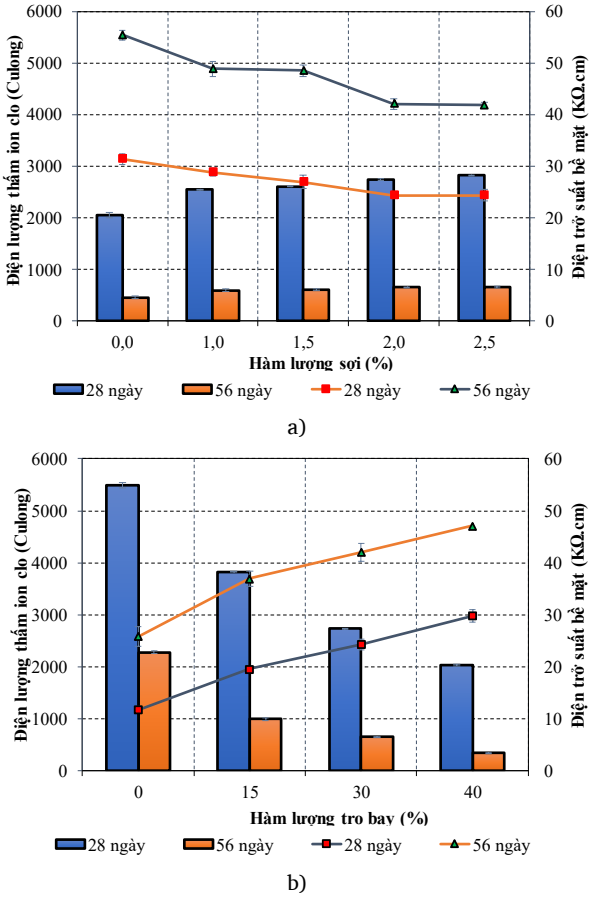
Hình 7. Độ hút nước theo: (a) Hàm lượng SD ở BTHM chứa 30 % TB; (b) Tỷ lệ TB ở BTHM chứa 2 % SD.

3.5. Điện trở suất bề mặt và điện lượng thấm ion chloride

Điện trở suất bề mặt (ESR) và điện lượng thấm ion chloride (Q_{RCPT}) được sử dụng để đánh giá đặc tính vận chuyển ion và mức độ cản trở sự xâm nhập của ion chloride trong bê tông, qua đó phản ánh khả năng kháng xâm nhập ion chloride của vật liệu.

Kết quả thí nghiệm ESR và Q_{RCPT} của BTHM theo hàm lượng SD, tỷ lệ TB ở 28, 56 ngày được thể hiện ở Hình 8a, 8b.

Kết quả Hình 6 cho thấy ESR của các cấp phối tăng theo tuổi dưỡng hộ, từ 11,7–31,4 kΩ.cm ở 28 ngày lên 20,8–55,4 kΩ.cm ở 56 ngày; ngược lại, Q_{RCPT} giảm từ 2060–5523 C xuống 339–2279 C. Xu hướng này cho thấy sự phát triển của cấu trúc vi mô theo thời gian góp phần đồng thời làm tăng điện trở suất và khả năng kháng xâm nhập ion chloride của BTHM.



Hình 8. Điện trở suất bề mặt và độ thấm ion chloride theo: (a) Hàm lượng SD ở BTHM chứa 30 % TB; (b) Tỷ lệ TB ở BTHM chứa 2 % SD.

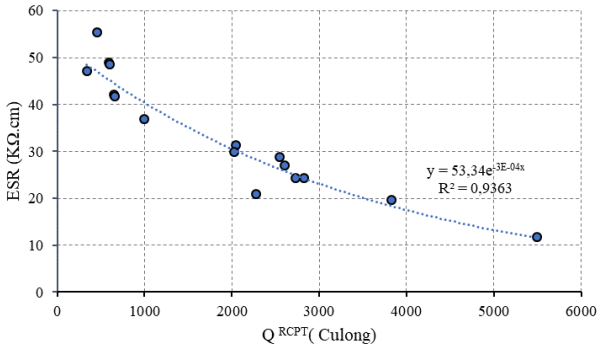
Ở BTHM chứa 2 % SD, khi tăng tỷ lệ TB từ 0 % lên 40 %, ESR đều tăng ở các mốc tuổi dưỡng hộ. Xét phân loại mức độ thấm ion chloride của AASHTO T358-24, kết quả cho thấy cấp phối 0TB-2SD từ mức thấm ion chloride cao (11,7 kΩ.cm) ở 28 ngày tuổi sang mức trung bình (20,8 kΩ.cm) ở 56 ngày tuổi, trong khi 15TB-2SD từ mức thấm ion chloride trung bình (19,6) chuyển sang thấp (36,9 kΩ.cm). Với 30 % và 40 % TB, ESR lần lượt tăng từ 24,3 và 29,9 kΩ.cm (mức thấp) ở 28 ngày tuổi lên khoảng 37 và 47,1 kΩ.cm (mức rất thấp). Kết quả này khẳng định hiệu quả của việc gia tăng hàm lượng TB trong cải thiện khả năng kháng xâm nhập ion chloride.

Kết quả Q_{RCPT} theo ASTM C1202-25 cũng xác nhận xu hướng trên: tại 28 ngày, điện lượng giảm từ 5523 C (0 % TB) xuống 3856, 2759 và 2044 C tương ứng với 15 %, 30 % và 40 % TB; đến 56 ngày, các giá trị tiếp tục giảm còn 2279, 995, 650 và 339 C. Như vậy, cả ESR và Q_{RCPT} đều cho thấy hàm lượng TB cao hơn và tuổi dưỡng hộ lớn hơn đều cải thiện đáng kể khả năng kháng xâm nhập ion chloride của BTHM.

Khả năng vận chuyển ion Cl^- trong bê tông phụ thuộc chủ yếu vào cấu trúc và tính liên thông của hệ mao quản, đồng thời chịu ảnh hưởng của dung dịch hóa học lỗ rỗng và khả năng liên kết Cl^- của nền xi măng [21, 22]. Sự gia tăng ESR đồng thời với giảm điện lượng thấm ion chloride khi tăng tỷ lệ TB cho thấy TB có thể là do phản ứng pozzolanic muộn giữa các oxit hoạt tính trong TB với Canxi Hydroxit tự do sinh ra gel C-S-H thứ cấp, giúp lấp đầy các mao quản hở và ngắt kết nối mạng lưới vi lỗ rỗng liên thông, từ đó trực tiếp nâng cao độ đặc chắc và khả năng kháng thâm nhập ion của cấu trúc bê tông [3, 22].

Tuy nhiên, ESR chủ yếu đặc trưng cho khả năng dẫn điện của bê tông, phụ thuộc vào cấu trúc lỗ rỗng và độ dẫn điện của dung dịch lỗ rỗng [23]. Trong khi thí nghiệm RCPT đo lượng điện tích truyền qua mẫu dưới điện trường cưỡng bức, chịu ảnh hưởng đồng thời của cấu trúc mao quản, độ dẫn điện của dung dịch lỗ rỗng và tương tác của ion chloride với vật liệu nền [24]. Trong BTHM chứa TB, Al_2O_3 hoạt tính trong TB tham gia phản ứng hóa học, cố định Cl^- tự do thông qua sự hình thành muối Friedel ($C_3A{\cdot}CaCl_2{\cdot}10H_2O$), qua đó làm giảm nồng độ Cl^- có khả năng khuếch tán với thí nghiệm RCPT [25] . Do đó, ESR và Q_{RCPT} có sự tương đồng về xu hướng nhưng khác biệt về mức phân loại giữa 2 thí nghiệm là hợp lý, phản ánh sự khác nhau về bản chất và độ nhạy của hai phương pháp đánh giá độ thấm ion chloride khác nhau [26].

Ở BTHM chứa 30 % TB, khi tăng hàm lượng SD từ 0 đến 2,5 %, ESR có xu hướng giảm, trong đó cấp phối 30TB-2,5SD giảm lần lượt 22,3 % và 24,6 % ở 28 và 56 ngày so với 30TB-0SD. Ngược lại, Q_{RCPT} tăng tương ứng 1,38 và 1,45 lần, cho thấy SD làm suy giảm khả năng kháng xâm nhập ion chloride của BTHM. Tuy nhiên, các cấp phối 30 % TB với hàm lượng SD khác nhau đều có ESR ở mức 24,3–55,4 kΩ.cm, được phân loại thấm ion chloride mức "thấp", "rất thấp" theo AASHTO T358-24. Theo ASTM C1202-25, Q_{RCPT} ở 28 ngày (2060–2848 C) thuộc mức trung bình và giảm còn 452–657 C ở 56 ngày, tương ứng mức thấm ion chloride "thấp". Kết quả cho thấy ảnh hưởng bất lợi của SD vẫn được hạn chế nhờ tác dụng cải thiện cấu trúc của 30 % TB theo tuổi dưỡng hộ.



Hình 9. Mối tương quan giữa điện trở suất bề mặt (ESR) và điện lượng thấm ion chloride (QRCPT) của các cấp phối BTHM.

Kết quả sự tăng mức độ thấm ion chloride (giảm ESR và tăng Q_{RCPT}) do khi tăng hàm lượng SD làm gia tăng độ rỗng, tạo ra các khe hở tự do tại vùng ITZ và mạng lưới mao dẫn liên thông [4, 5, 7], làm tăng khả năng xâm nhập ion chloride vào bê tông [7, 27].

Mối tương quan giữa kết quả ESR và Q_{RCPT} của BTHM sử dụng TB và SD được thể hiện ở Hình 9.

Kết quả cho thấy ESR và Q_{RCPT} của các cấp phối BTHM rất chặc chẽ với phương trình tương quan dạng hàm mũ:

$$ESR = 53{,}34.\exp(-3.10^{-4}.\ Q_{RCPT})$$

Hệ số tương quan của phương trình hồi quy khá cao $R^2 = 0{,}9363$ cao phản ánh độ tin cậy và mức độ phù hợp chặt chẽ của 2 đại lượng đo ESR và Q_{RCPT} của bê tông. Kết quả tương quan chặt chẽ này mang ý nghĩa thực tiễn lớn trong công tác quản lý chất lượng bê tông tại hiện trường. Nó cho thấy tiềm năng sử dụng ESR như một phương pháp kiểm tra nhanh không phá hủy tin cậy để dự báo trực tiếp và độ bền kháng chloride của BTHM mà không cần thực hiện các thí nghiệm RCPT phức tạp và tốn thời gian.

3.6. Đánh giá tổng hợp và đề xuất cấp phối

BTHM có diện tích bề mặt hạt lớn, hàm lượng CKD cao nên dễ phát sinh co ngót, nứt sớm và tăng chi phí chế tạo. Tuy nhiên, nền hạt mịn đồng nhất thuận lợi cho SD (SD) phân tán đa hướng và phát huy hiệu ứng bắc cầu. Do đó, lựa chọn cấp phối cần cân bằng giữa tính công tác, cường độ và độ bền.

Kết quả nhóm cấp phối 2 % SD cho thấy sự đánh đổi rõ theo hàm lượng TB. Cấp phối 0TB-2SD có cường độ 56 ngày tương đối cao (R_n = 43,0 MPa; R_{ku} = 7,26 MPa), nhưng khả năng kháng chloride còn hạn chế (Q_{RCPT} = 2279 C; ESR = 20,9 kΩ.cm). Khi tăng TB lên 40 %, Q_{RCPT} giảm còn 339 C và ESR tăng lên 47,1 kΩ.cm, đồng thời độ sụt đạt 14,0 cm; tuy nhiên, R_n và R_{ku} giảm còn 39,7 và 6,42 MPa. Trong khi đó, 15TB-2SD đạt R_n cao nhất (44,3 MPa), nhưng Q_{RCPT} vẫn ở mức 995 C.

Ở hàm lượng 30 % TB, 30TB-1,5SD và 30TB-2SD thể hiện sự cân bằng tốt giữa các tính chất. 30TB-1,5SD có ưu thế về tính công tác và kháng chloride, với độ sụt 14,5 cm, ESR = 48,5 kΩ.cm và Q_{RCPT} = 603 C ở 56 ngày. Ngược lại, 30TB-2SD có R_{ku} cao hơn (7,03 so với 6,81 MPa), trong khi R_n tương đương (42,1 và 42,5 MPa). Cả hai cấp phối đều đạt Q_{RCPT} < 1000 C và ĐHN = 4,86–4,87 % ở 56 ngày, thể hiện sự kết hợp tốt giữa cơ tính và độ bền.

Sự cân bằng này có thể liên quan đến tác động bổ trợ của TB và SD: SD hạn chế phát triển vi nứt thông qua hiệu ứng bắc cầu, trong khi phản ứng pozzolan của TB góp phần cải thiện cấu trúc nền và vùng chuyển tiếp quanh sợi; đồng thời, hình thái hạt cầu của TB hỗ trợ duy trì tính công tác.

Trên cơ sở đánh giá tổng hợp, khoảng cấp phối 30TB và 1,5–2 % SD được đề xuất là vùng cấp phối có hiệu năng cân bằng phù hợp cho BTHM. Trong đó, 30TB-1,5SD phù hợp khi ưu tiên tính công tác và kháng chloride, còn 30TB-2SD có lợi thế về cường độ kéo uốn. Kết quả cho thấy khoảng hàm lượng này có khả năng đồng thời duy trì cơ tính và độ bền, đồng thời tăng mức sử dụng phế phụ phẩm và giảm hàm lượng xi măng.

4. Kết luận

Từ nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của sợi dừa (SD) và tro bay (TB) đến các đặc tính của BTHM cho phép rút ra các kết luận chính như sau:

1. Ở BTHM chứa 30 % TB, khi hàm lượng SD tăng từ 0 đến 2,5 %, độ sụt giảm từ 18 xuống 8 cm và khối lượng thể tích tươi giảm 7,4 %, do đặc tính rỗng xốp, tính ưa nước của SD và hiệu ứng cản trở ma sát nội. Ngược lại, BTHM chứa 2 % SD, khi tỷ lệ TB tăng từ 0 đến 40 % giúp cải thiện tính công tác nhờ hiệu ứng "bi lăn", làm tăng độ sụt từ 10 cm lên 14 cm.

2. Ở BTHM chứa 30 % SD, khi hàm lượng SD tăng từ 0 đến 2,5 %, tại 56 ngày, Rn đạt 42,1–42,5 MPa ở 1,5–2 % SD; với hàm lượng SD vượt 2 % làm giảm Rn và UPV. Với 2 % SD cố định, phản ứng pozzolan của TB làm đặc chắc vi cấu trúc ở tuổi muộn; các cấp phối 15TB-2SD và 30TB-2SD đạt cường độ tương đương mẫu đối chứng 0TB-2SD. Ở 56 ngày, UPV của các cấp phối đạt 4178–4461 m/s, tương ứng chất lượng bê tông ở mức "Tốt".

3. Việc bổ sung SD vào BTHM chứa 30 % TB cho thấy sự cải thiện rõ R_{ku} nhờ cơ chế bắc cầu sợi và hạn chế lan truyền vết nứt. Tại 56 ngày, R_{ku} tăng tối đa 19,2 %, đạt 7,13 MPa ở 2,5 % SD; tuy nhiên, mức gia tăng có xu hướng giảm khi hàm lượng SD vượt 2 %.

4. BTHM với 2 % SD cố định, khi tăng tỷ lệ TB từ 0 lên 40 % làm ESR tăng 125,5 %, đạt 47,1 kΩ.cm, đồng thời Q_{RCPT} giảm 85,1 %, xuống 339 C ở 56 ngày, qua đó cải thiện mức kháng xâm nhập ion chloride từ "Trung bình" lên "Rất thấp". Độ hút nước thấp nhất được ghi nhận ở mức 4.87 % với cấp phối chứa 30 % TB. Mối tương quan dạng hàm mũ giữa ESR và Q_{RCPT} (R^2 = 0,936) cho thấy tiềm năng sử dụng ESR như một chỉ số thử nghiệm không phá hủy nhanh để đánh giá khả năng kháng chloride của BTHM.

5. Khoảng cấp phối BTHM chứa 30 % TB kết hợp với 1,5–2 % SD (30TB-1.5SD và 30TB-2SD) cho thấy sự cân bằng giữa tính công tác (độ sụt 12,0–14,5 cm), tính chất cơ học ở tuổi muộn (R_n = 42,1–42,5 MPa; R = 6,81–7,03 MPa) và khả năng kháng xâm nhập ion chloride (Q_{RCPT} = 603–650 C; ESR = 41,4–48,5 kΩ.cm). Trong đó, 30TB-1,5SD có ưu thế về tính công tác và khả năng cản ion chloride, trong khi 30TB-2SD vượt trội hơn về R_{ku}.

Tài liệu tham khảo

[1]. Huntzinger, D.N. and T.D. Eatmon (2009), *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*, Journal of Cleaner Production, 17(7): p. 668–675.

[2]. Nguyễn Tấn Khoa (2022), *Nghiên cứu tính năng bê tông cát sử dụng tro bay, xỉ lò cao cho kết cấu công trình trong môi trường biển Miền Trung*, Đại học Giao thông vận tải.

[3]. Khan, M. and M. Ali (2019), *Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres*, Construction and Building Materials, 203: p. 174–187.

[4]. Ali, B., et al. (2022), *A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials*, Construction and Building Materials, 351: p. 128957.

[5]. Wang, B., L. Yan, and B. Kasal (2022), *A review of coir fibre and coir fibre reinforced cement-based composite materials* (2000–2021), Journal of Cleaner Production, 338: p. 130676.

[6]. Lê Nguyễn Thiện Huy và Võ Nhật Luân (2025), Nghiên cứu sử dụng phế thải kính, tro bay và sợi xơ dừa để chế tạo bê tông thân thiện với môi trường phục vụ xây dựng nhà ở trên địa bàn các tỉnh Tây Nam Bộ, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng – Bộ Xây dựng, 15(04): p. 50–58, doi: 10.54772/jomc.04.2025.1065.

[7]. Ahmad, J., et al. (2022), *Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete: a state-of-the-art review*, Materials, 15(10): p. 3601.

[8]. Trần Mạnh Tiến và Đỗ Ngọc Tú (2024), *Bê tông cốt sợi tự nhiên: Các đặc tính cơ học và khả năng ứng dụng*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao Thông Vận Tải, 13(6): p. 25–37.

[9]. Siddique, R. and M.I. Khan (2011), *Supplementary cementing materials*, Springer Science & Business Media.

[10]. Neville, A.M. (2011), *Properties of concrete*, 5th ed., England: Pearson.

[11]. Nguyễn Văn Chính, Đặng Văn Mến (2019), *Ảnh hưởng của tro bay nhiệt điện Duyên Hải đến cường độ chịu nén và khả năng chống thấm của bê tông*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, 17: p. 11–14.

[12]. Nguyễn Thế Anh, Lê Nguyễn Phú Trường (2021), *Nghiên cứu tính chất cơ lý của bê tông sợi tự nhiên khu vực đồng bằng sông Cửu Long*, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng – Bộ Xây dựng, 11(02): p. 35–42.

[13]. Lê Anh Thắng, Tô Minh Đoàn. (2024), *Đánh giá các tính chất cơ học của bê tông cường độ cao kết hợp cát mịn cửa sông với tro bay và gia cường bằng sợi polypropylene*, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng – Bộ Xây dựng, 14(05): p. 30–35.

[14]. Nguyễn Công Hậu, Nguyễn Thị Thu Thuỷ (2024), *Nghiên cứu đặc tính cơ học của bê tông cường độ cao dùng nhiều tro bay có kết hợp các loại và hàm lượng sợi khác nhau*, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng – Bộ Xây dựng, 14(02): p. 54–60.

[15]. Da Silva, E.J., et al. (2017), *A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex/pozzolanic materials*, Sustainable Materials and Technologies, 12: p. 44–51.

[16]. Lakhiar, M.T., et al. (2021), *Effect of banana skin powder and coir fibre on properties and flexural behaviour of precast SCC beam, International Journal of Sustainable Engineering*, 14(5): p. 1193–1206.

[17]. Wardhono, A., et al. (2017), *Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes,* Construction and Building Materials, 143: p. 272–279.

[18]. Whitehurst, E.A. *Soniscope tests concrete structures*. in *Journal Proceedings*. 1951.

[19]. Sathiparan, N., M.N. Rupasinghe, and B.H. Pavithra (2017), *Performance of coconut coir reinforced hydraulic cement mortar for surface plastering application*, Construction and Building Materials, 142: p. 23–30.

[20]. Ramli, M., W.H. Kwan, and N.F. Abas (2013), *Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments*, Construction and Building Materials, 38: p. 554–566.

[21]. Thomas, M. (1996), *Chloride thresholds in marine concrete*, Cement and Concrete Research, 26(4): p. 513–519.

[22]. Liu, J., et al. (2014), *Permeation properties and pore structure of surface layer of fly ash concrete,* Materials, 7(6): p. 4282–4296.

[23]. Pablo-Calderón, M.A., P.F.d.J. Cano-Barrita, and F.M. León-Martínez (2023), *Exploring the detection of Cl^- penetration in Portland cement mortars via surface electrical resistivity*, Materials, 16(22): p. 7123.

[24]. Shi, C. (2004), *Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test* (ASTM C1202 or AASHTO T277) results, Cement and Concrete Research, 34(3): p. 537–545.

[25]. Thomas, M., et al. (2012), *The effect of supplementary cementing materials on chloride binding in hardened cement paste*, Cement and Concrete Research, 42(1): p. 1–7.

[26]. Obla, K.H. and C.L. Lobo (2021), *Electrical Tests for Concrete Penetrability, Part 1*, ACI Materials Journal, 118(5): p. 45–54, doi: 10.14359/51732934.

[27]. Chen, Z., Chea, T., Luo, J., Wei, J. and Zhao, G. (2025), *Application of coir fibers in eco-friendly biomass coral concrete: Mechanical properties, chloride attack and deterioration mechanism*, Journal of Building Engineering, 111: p. 113536, doi: 10.1016/j.jobe.2025.113536.