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

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

Nguyễn Công Hậu[1*], Nguyễn Thị Thu Thủy[1]

[1] Trường Đại học Giao thông vận tải

TỪ KHOÁ

Bê tông cường độ cao
Bê tông hàm lượng tro bay cao
Tính chất cơ học
Sợi thép
Sợi polypropylene

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sử dụng tro bay (FA) của nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân với hàm lượng lớn và các nguyên vật liệu phía Nam, sợi thép (SF) và sợi Polypropylene (PP) để chế tạo bê tông cường độ cao. Loại bê tông này có thể đạt cường độ chịu nén thiết kế 28 ngày cao hơn 60 MPa, tuy nhiên có mẫu thực tế đạt trên 80 MPa. Nghiên cứu các cấp phối bê tông ở các tỷ lệ phối trộn thể tích sợi thép lần lượt là 0,5 %; 1,0 %, 1,5 %, tỷ lệ phối trộn sợi PP là 1,5 %, và cấp phối hỗn hợp 0,75 % SF và 0,75 %PP. Nhận thấy khi thêm sợi thép và sợi PP vào hỗn hợp bê tông thì độ sụt giảm, nhất là sợi PP giảm mạnh từ 17cm xuống còn 4 cm; cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi ép chẻ ở 28 ngày cũng tăng thêm 10% đến 15 % so với mẫu không có sợi; độ hút nước cũng giảm mạnh do cấu trúc bê tông càng đặc chắc khi thêm sợi và cơ chế tác dụng của tro bay. Nghiên cứu đề xuất tỷ lệ phối trộn hợp lý của bê tông là 0,75 % SF và 0,75 % PP để đáp ứng đồng thời các tiêu chí về tính công tác, cường độ, độ hút nước và giá thành.

KEYWORDS

High strength concrete (HSC)
High-Volume Fly Ash Concrete (HVFAC)
Mechanical properties
Steel Fiber
Polypropylene Fiber

ABSTRACT

This paper presents the results of research on using fly ash (FA) from the Vinh Tan thermal power plant with high content and Southern raw materials, steel fiber (SF), and Polypropylene fiber (PP) to make reinforced concrete. This type of concrete can achieve a 28-day design compressive strength of more than 60 MPa, however, there are actual samples that reach over 80 MPa. Research on concrete mixes at steel fiber volume mixing ratios of 0,5 %; 1,0 %, 1,5 %, PP fiber mixing ratio is 1,5 %, and mixed gradation 0,75 % SF and 0,75 % PP. It was found that when adding steel fibers and PP fibers to the concrete mixture, the slump decreased, especially PP fibers decreased sharply from 17cm to 4cm; Compressive strength and tensile strength when being split at 28 days also increased by 10 % to 15 % compared to samples without fibers; Water absorption also decreases sharply because the concrete structure becomes denser when adding fibers and the mechanism of action of fly ash. The study proposes a reasonable mixing ratio of concrete of 0,75 % SF and 0,75 % PP to simultaneously meet the criteria of workability, strength, water absorption, and cost.

1. Đặt vấn đề

Tro bay hàng năm trên thế giới phát thải ra khoảng 900 Mt (tỷ tấn), trong đó Ấn Độ 169,25 Mt, Trung Quốc 580 Mt, Mỹ 43,5 Mt, Việt Nam đang ở mức là 16 Mt. Trên thế giới, việc tái sử dụng tro bay trên tổng lượng tro ở mức trung bình, đối với Việt Nam tỷ lệ tận dụng lại chưa cao và tốn hàng trăm hecta để làm bãi chứa tro bay gây ảnh hưởng rất lớn đến môi trường. Theo các nghiên cứu trước đây, tro bay thường được sử dụng để thay thế một phần chất kết dính trong bê tông với hàm lượng thường giới hạn nhỏ hơn 30 %. Những nghiên cứu gần đây về tro bay có thể thay thế lên tới 50 % ứng dụng cho bê tông làm mặt đường ô tô, hoặc một số nghiên cứu thay thế tro bay lên tới 60 % chất kết dính để chế tạo bê tông cường độ cao lên tới 60MPa. Như vậy, việc sử dụng phế thải tro bay vừa giải quyết được vấn đề ô nhiễm môi trường do chôn lấp tro bay gây ra, mà còn thay thế được một lượng lớn xi măng giúp giảm giá thành bê tông, hạn chế lượng khí thải CO_2 gây hiệu ứng nhà kính trong quy trình sản xuất xi măng [1]. Có nhiều nghiên cứu đa phần sử dụng mụi silic cho bê tông cốt sợi cường độ cao. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu sử dụng 50 % tro bay thay thế cho xi măng để chế tạo bê tông cường độ cao có cốt sợi.

Bê tông được sử dụng rộng rãi vì có nhiều ưu điểm như cường độ chịu nén cao, chi phí thấp, nguyên liệu sẵn có, dễ tạo hình, khả năng ứng dụng lớn, … Tuy nhiên bê tông là vật liệu giòn và độ giòn tăng theo cường độ chịu nén, độ bền kéo tương đối thấp và khả năng chống mở rộng và lan truyền vết nứt kém là nhược điểm chính của bê tông xi măng thông thường. Bê tông cốt sợi hỗn hợp (BTCSHH) đã được nghiên cứu và đưa vào ứng dụng rộng rãi trên thế giới. Các nghiên cứu cho thấy: mỗi loại sợi khi đưa vào thành phần của bê tông sẽ tạo ra những loại bê tông hỗn hợp khác nhau. Khi sử dụng sợi thép, bê tông được cải thiện đáng kể về cường độ uốn, kéo dọc trục, môđun

*Liên hệ tác giả: haunc_ph@utc.edu.vn
Nhận ngày 07/03/2024, sửa xong ngày 27/03/2024, chấp nhận đăng ngày 01/04/2024
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.02.2024.658

đàn hồi, chống nứt do co cứng. Khi sử dụng sợi PP, bê tông sẽ được cải thiện đáng kể về hạn chế biến dạng mềm, giúp cho khả năng kháng va đập rất cao. Do vậy, sử dụng kết hợp 2 loại sợi này cho phép tạo ra bê tông có những ưu điểm vượt trội so với việc sử dụng riêng biệt từng loại sợi, đặc biệt là làm tăng tính dẻo dai, chống nứt do co mềm và co cứng cho bê tông. Loại bê tông này nhằm ứng dụng vào thực tế xây dựng, đảm bảo thi công tốt, có thể dùng cho các lớp phủ có bề mặt có cường độ cao như: đường băng, sân bay, đường cao tốc, đập tràn, chống thấm, sửa chữa và gia cường kết cấu dầm, cầu, hầm, các kết cấu phải chịu tải trọng cao hoặc chịu tải trọng hỗn hợp [2].

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu

Nguyên vật liệu đầu vào được sử dụng để nghiên cứu được tóm tắt trong Bảng 1 [3].

Bảng 1. Đặc tính của nguyên vật liệu đầu vào.

STT	Loại nguyên liệu	Tên nguyên liệu	Nơi sản xuất	Tiêu chuẩn	Đặc tính thử nghiệm
1	Xi măng	PCB40	Xi măng Nghi Sơn	TCVN 6260:2009	Khối lượng riêng 3,10 g/cm3; độ mịn (lượng sót trên sàng 90μm) 2,0 %; Cường độ chịu nén, uốn tuổi 28 ngày 55 MPa; 6,3 MPa.
2	Cốt liệu mịn	Cát sông	Sông Đồng Nai	TCVN 7570:2006	Mô đun độ lớn 2,4; khối lượng riêng 2,65 g/cm^3; khối lượng thể tích 1350 kg/m^3; độ rỗng 43,7%
3	Cốt liệu thô	Đá dăm	Tỉnh Bình Dương	TCVN 7570:2006	D_{max} = 20mm; Khối lượng riêng 2,70 g/cm^3; khối lượng thể tích xốp 1 430 kg/m^3, độ hút nước: 0,5%
4	Tro bay	Vĩnh Tân	Nhà máy Nhiệt điện Vĩnh Tân, Bình Thuận	TCVN 10302:2014	Phù hợp với yêu cầu của tro bay loại F
5	Phụ gia	ADVA Cast 5388	Grace	TCVN 8826:2011	Phụ gia siêu dẻo gốc Polycarboxylate
6	Nước	Nước máy		TCVN 4506:2012	
7	Sợi SF	Sợi thép tròn Dramix	Hàn Quốc	ASTM A820-01	Sợi thép tiết diện tròn; Chiều dài 35mm; đường kính 0,7mm; tỷ lệ hướng sợi 50; tổng diện tích bề mặt 6600 cm^2/kg; số lượng sợi 8600 sợi/kg; Cường độ chịu kéo hơn 10000 daN/cm^2
8	Sợi PP	Sợi tổng hợp PP	Công Ty THT International	ASTM C1116	Chiều dài/đường kính (l/d) = 150; khối lượng riêng 0,9 g/cm^3; Mô đun đàn hồi 3,5 GPa; Cường độ chịu kéo 0,55-0,75 GPa

2.2. Tỷ lệ phối trộn

Nghiên cứu thực nghiệm tiến hành thiết kế thành phần bê tông sử dụng hàm lượng tro bay cao thay thế 50 % xi măng có sử dụng sợi SF và sợi PP có cường độ chịu nén yêu cầu ở 28 ngày tuổi là f'c = 60 MPa. Thiết kế thành phần bê tông theo tiêu chuẩn ACI211.1-91 [4]. Thiết kế cấp phối có tỷ lệ N/CKD = 0,31 cố định; mẫu đối chứng không sử dụng tro bay và sợi kí hiệu là M0; các mẫu còn lại đều sử dụng 50% hàm lượng tro bay thay thế xi măng. Các loại và hàm lượng sợi khác nhau được tính theo tổng khối lượng bê tông và được thêm vào hỗn hợp. Trong đó, các cấp phối có hàm lượng sợi thép SF lần lượt là 0 %; 0,5 %; 1,0 %; 1,5 % được kí hiệu lần lượt là M1, MSF05, MSF10, MSF15. Tương tự cấp phối có hàm lượng sợi PP chiếm 1,5 % kí hiệu MPP15; cấp phối hỗn hợp 0,75 % SF và 0,75 % PP kí hiệu là MSFPP.

Bảng 2. Thành phần bê tông xi măng có sử dụng tro bay cho 1 m^3.

TT	Vật liệu thành phần	M0	M1	MSF05	MSF10	MSF15	MPP15	MSFPP
1	Xi măng PCB40, kg/m^3	450	225	225	225	225	225	225
2	Tro bay, kg/m^3	0	225	225	225	225	225	225
3	Cát, kg/m^3	705	705	705	705	705	705	705
4	Đá dăm 1x2, kg/m^3	1154	1154	1154	1154	1154	1154	1154
5	Nước, lít	140	140	140	140	140	140	140
6	Phụ gia siêu dẻo, lít/m^3 - % CKD	4,5-1 %	4,5-1 %	4,95-1,1 %	5,4-1,2 %	5,4-1,2 %	6,3-1,4 %	5,85-1,3 %
7	Sợi SF (%)	0	0	0,5	1,0	1,5	0	0,75
8	Sợi PP (%)	0	0	0	0	0	1,5	0,75
9	Nước/CKD	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
10	Độ sụt hỗn hợp (cm)	12	17	15	13	10	4	7

2.3. Phương pháp nghiên cứu

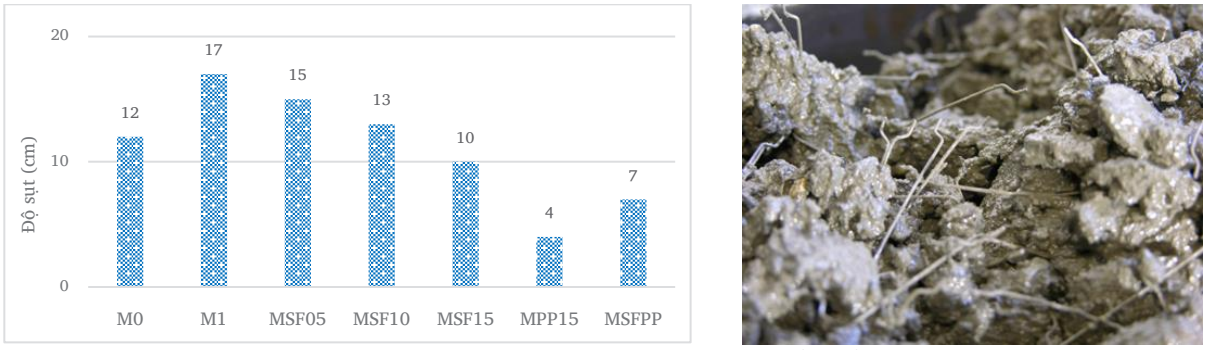
Trong nghiên cứu đã áp dụng các tiêu chuẩn thí: TCVN 7570:2006; TCVN 6260:2009; TCVN 10302:2014; TCVN 8826:2011; TCVN 4506:2012; ASTM A820-01; ASTM C1116; ACI211.1-91; TCVN 3106:1993; TCVN 3118:1993; TCVN 8862:2011; TCVN 3113:2022; TCVN 10306:2014.

Công tác chế tạo và thí nghiệm mẫu hỗn hợp bê tông và bê tông tuân thủ các yêu cầu của các tiêu chuẩn Việt Nam và được tiến hành nghiên cứu tại phòng thí nghiệm LAS-XD225 thuộc Phân hiệu trường Đại học Giao Thông Vận Tải tại TP. Hồ Chí Minh.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Tính chất của hỗn hợp bê tông

Quy trình xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông nặng được tiến hành theo TCVN 3106:1993 [5]. Tất cả các cấp phối trộn đều không có sự phân tầng, tách nước.



Hình 1. Độ sụt và hỗn hợp bê tông ứng với các cấp phối khác nhau.

Từ kết quả ở Hình 1, nhận thấy khi giữ nguyên tỷ lệ N/CKD ở tất cả các mẻ trộn thì độ sụt của mẫu có thay thế 50 % xi măng bởi tro bay (mẫu M1) là cao nhất 17 cm, rồi đến mẫu đối chứng M0 là 12 cm. Điều này có thể được giải thích là khi thay thế cùng khối lượng xi măng bởi tro bay thì thể tích hồ sẽ tăng lên (do khối lượng riêng của xi măng cao hơn của tro bay), lượng hồ chất kết dính tăng thì lớp hồ bao bọc xung quanh hạt cốt liệu tăng, khi đó các hạt cốt liệu sẽ trượt lên nhau dễ dàng và làm tăng độ linh động cho hỗn hợp bê tông. Ngoài ra tro bay có dạng hình cầu, bề mặt trơn nhẵn, kích thước tương đương hoặc nhỏ hơn so với hạt xi măng sẽ tạo hiệu ứng "bi lăn" làm tăng tính công tác của hỗn hợp bê tông khi nhào trộn [6, 7, 8]. Tiếp theo đến các mẫu có pha trộn sợi thép lần lượt là 0,5 %; 1,0 %; 1,5 % so với khối lượng bê tông thì độ sụt giảm dần tương ứng là 15 cm, 13 cm, 10 cm; mặc dù ứng với các tỷ lệ phối trộn sợi thép này có tăng lượng dùng phụ gia siêu dẻo từ 1 % lên 1,2 %. Mẫu có pha trộn 1,5 % sợi PP có độ sụt thấp nhất là 4cm với lượng dùng phụ gia siêu dẻo cao nhất 1,4 %, còn mẫu hỗn hợp giữa 2 loại sợi có độ sụt trung gian là 7 cm. Kết quả cho thấy, việc sử dụng sợi thép ít ảnh hưởng tới độ linh động của hỗn hợp. Tuy nhiên, việc sử dụng sợi PP có ảnh hưởng đáng kể tới sự linh động của hỗn hợp do sợi PP có đường kính rất nhỏ, mảnh, dài và dễ bị rối hoặc bị uốn cong nên cản trở một phần sự chuyển dịch của các cấu tử bên trong hỗn hợp [9,10].

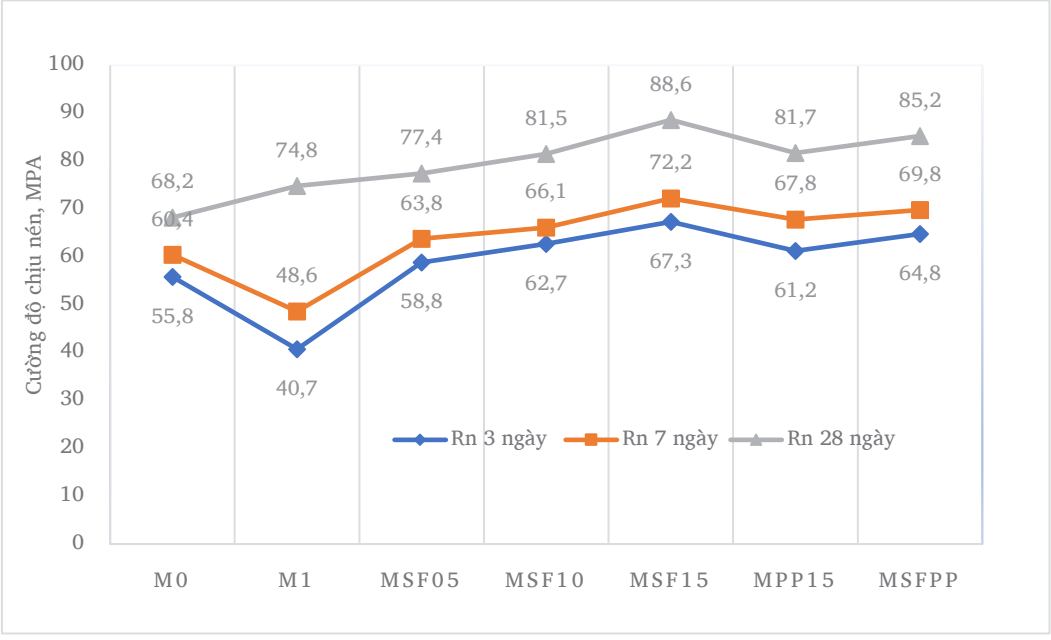
3.2. Cường độ chịu nén

Quy trình xác định cường độ chịu nén (Rn) của bê tông được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 3118:1993 [11], đúc mẫu trụ chuẩn dxh = 15x30 (cm). Kết quả xác định Rn được thể hiện ở Bảng 3, Hình 2 và 3.

Bảng 3. Kết quả Rn ở 3,7 và 28 ngày tuổi với các tỷ lệ tro bay thay thế xi măng.

TT	Cường độ chịu nén	M0	M1	MSF05	MSF10	MSF15	MPP15	MSFPP
1	Rn 3 ngày (MPa)	55,8	40,7	58,8	62,7	67,3	61,2	64,8
2	Rn 7 ngày (MPa)	60,4	48,6	63,8	66,1	72,2	67,8	69,8
3	Rn 28 ngày (MPa)	68,2	74,8	77,4	81,5	88,6	81,7	85,2

Hình 2. Thử Rn và dạng vết nứt sau khi nén.



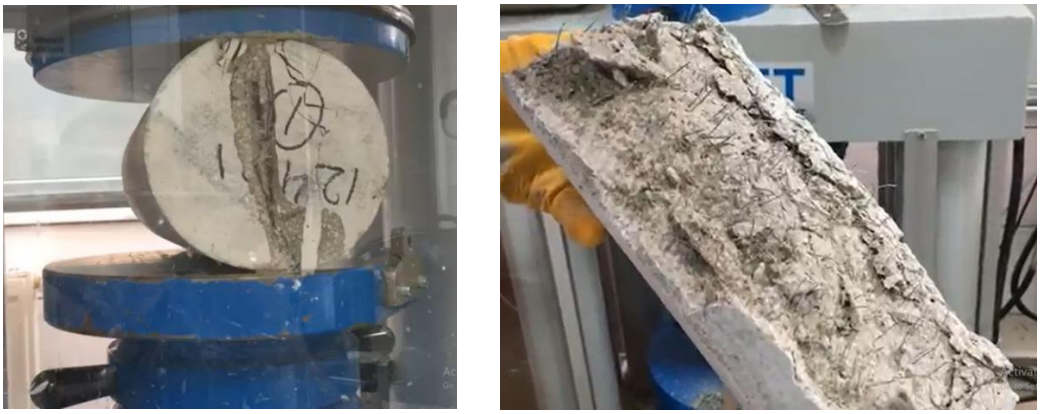
Hình 3. Biểu đồ quan hệ cường độ Rn ở 3,7 và 28 ngày tuổi với các tỷ lệ cấp phối.

Cường độ chịu nén 3,7 ngày của mẫu M1 có thay thế 50 % xi măng bởi tro bay thấp hơn so với mẫu đối chứng M0, tuy nhiên 28 ngày thì lại cao hơn (cao hơn khoảng 9,7 %). Như vậy việc sử dụng tro bay thay thế xi măng giúp tăng cường độ ở tuổi muộn ngày. Vì việc sử dụng tro bay sẽ cải thiện liên kết giữa hạt xi măng và cốt liệu cũng như tăng mật độ của hồ dính kết làm cải thiện cường độ nén. Cường độ chịu nén của tất cả các cấp phối đều tăng nhanh ở tuổi sớm ngày 3,7 ngày (cụ thể 3 ngày đạt trên 75 %, 7 ngày đạt trên 80 % cường độ 28 ngày). Đây là đặc trưng của bê tông cường độ cao cần cường độ sớm lớn do phát huy được tác dụng của phụ gia siêu dẻo và lượng dùng xi măng lớn (nghiên cứu sử dụng xi măng Nghi Sơn có nhiều khoáng C_3S và C_2S giúp tăng cường độ cao). Sau 7 ngày tốc độ phát triển cường độ giảm dần và tăng đều đến 28 ngày và vẫn còn tiếp tục tăng ở các ngày tuổi tiếp theo do sự phát triển cường độ

muộn của tro bay. Việc trộn sợi thép và sợi PP riêng lẻ hay hỗn hợp ở bất kì tỷ lệ nào đều cho cường độ chịu nén cao hơn so với mẫu đối chứng M0 ở tất cả các ngày tuổi. Tuy nhiên khi hàm lượng sợi thép trộn riêng lẻ càng cao thì cường độ chịu nén càng tăng và cao hơn so với khi trộn sợi PP và trộn hỗn hợp. Cụ thể xét ở cùng tỷ lệ trộn 1,5 % sợi SF và 1,5 % sợi PP thì cường độ 28 ngày của sợi SF cao hơn 8,4 % so với dùng sợi PP. Điều này được giải thích do cường độ, mô đun đàn hồi của sợi thép cao hơn so với sợi PP nên mang lại hiệu quả cao trong việc lấp đầy các vết nứt vĩ mô giúp tăng khả năng chịu nén. Ngoài ra còn nhận thấy việc sử dụng sợi riêng lẻ hay hỗn hợp đều không ảnh hưởng đến tốc độ phát triển cường độ chịu nén mà chỉ làm tăng giá trị cường độ chịu nén ở tất cả các ngày tuổi. Sự tăng cường độ chịu nén khi dùng sợi này có thể được giải thích là do sợi có khả năng hạn chế sự mở rộng vết nứt, làm thay đổi hướng của vết nứt và làm chậm tốc độ phát triển vết nứt [10, 12].

3.3. Cường độ kéo khi ép chẻ

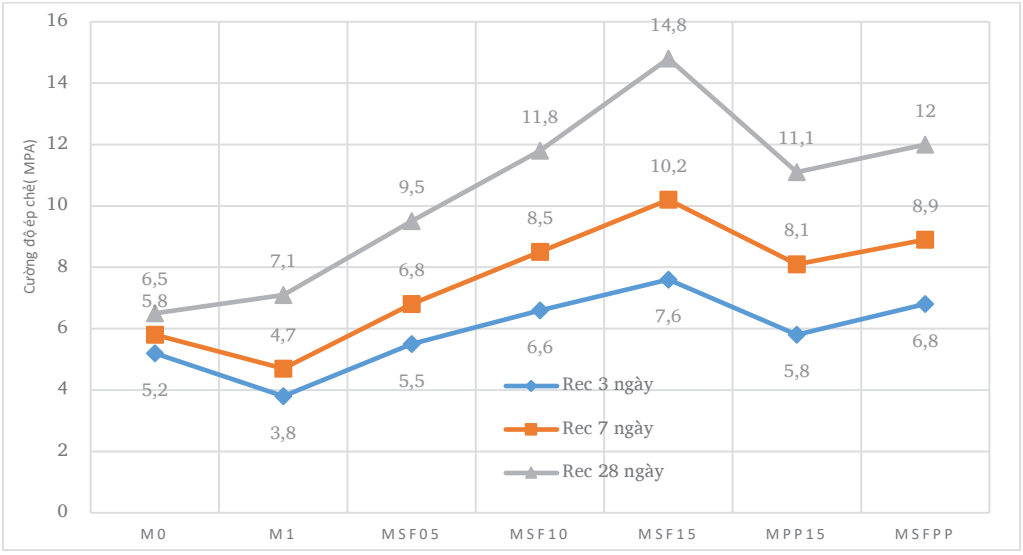
Thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chẻ được tiến hành theo TCVN 8862:2011, đúc mẫu trụ chuẩn [14]. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi ép chẻ được thể hiện ở Hình 4 và Bảng 4.



Hình 4. Thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chẻ.

Bảng 4. Kết quả cường độ chịu kéo khi bị ép chẻ ở 3,7 và 28 ngày tuổi với các tỷ lệ tro bay thay thế xi măng.

TT	Cường độ ép chẻ	M0	M1	MSF05	MSF10	MSF15	MPP15	MSFPP
1	R_{ec} 3 ngày (MPa)	5,2	3,8	5,5	6,6	7,6	5,8	6,8
2	R_{ec} 7 ngày (MPa)	5,8	4,7	6,8	8,5	10,2	8,1	8,9
3	R_{ec} 28 ngày (MPa)	6,5	7,1	9,5	11,8	14,8	11,1	12,0



Hình 5. Quan hệ giữa cường độ kéo khi ép chẻ ở 3,7 và 28 ngày tuổi với các tỷ lệ trộn.

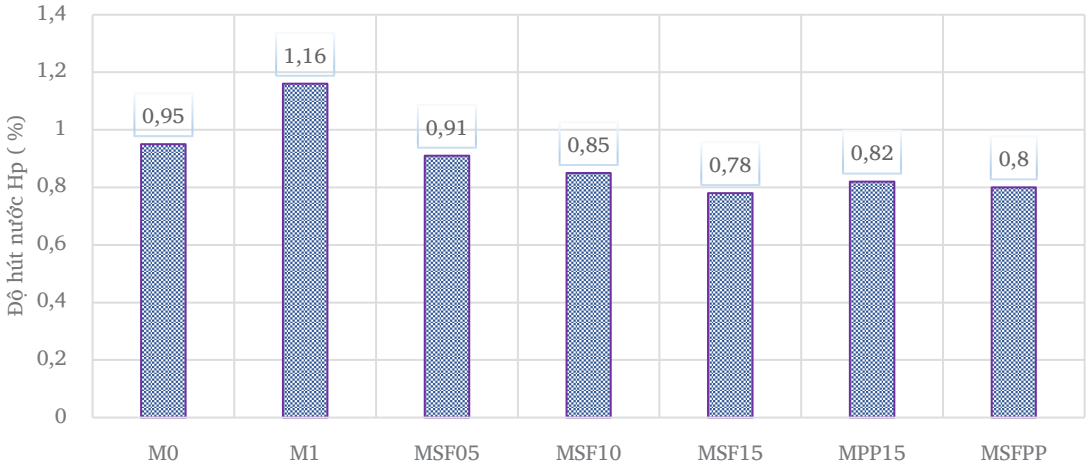
Cũng như cường độ chịu nén, quy luật phát triển cường độ chịu kéo khi ép chẻ cũng tăng nhanh giai đoạn sớm ngày 3,7 ngày và chậm giai đoạn sau cho tất cả các cấp phối. Kết quả cho thấy việc dùng sợi đặc biệt là sợi thép làm tăng đáng kể cường độ chịu kéo khi ép chẻ. Cụ thể mẫu MSF15 có Rec 28 ngày tăng hơn gấp đôi so với Rec 28 ngày mẫu đối chứng. Việc dùng sợi thép giúp tăng Rec cao hơn so với dùng sợi PP ở cùng tỷ lệ, điều này có thể do sợi PP ngắn và có độ bền kéo và mô đun đàn hồi thấp hơn so với sợi thép. Tuy nhiên Rec của mẫu hỗn hợp MSFPP phối trộn tỷ lệ SF và PP bằng nhau khá cao tới 12MPa. Nên nếu xét về hiệu quả kinh tế khi giảm hàm lượng sợi thép và tăng hàm lượng sợi PP mà vẫn cho giá trị Rn và Rec khá cao thì đây là tỷ lệ phối trộn tối ưu về giá thành và cường độ mong muốn [10, 13].

3.4. Độ hút nước

Thử nghiệm độ hút nước của bê tông cốt sợi được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 3113:2022 [15]. Kết quả độ hút nước của bê tông cốt sợi được trình bày trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm xác định độ mài mòn với các tỷ lệ thay thế tro bay.

TT	Đô hút nước (%)	M0	M1	MSF05	MSF10	MSF15	MPP15	MSFPP
1	Hp	0,95	1,16	0,91	0,85	0,78	0,82	0,80



Hình 6. Độ hút nước của các mẫu bê tông cốt sợi với tỷ lệ phối trộn khác nhau.

Độ hút nước của bê tông là một trong những yếu tố chính ảnh hưởng đến độ bền của bê tông. Độ hút nước gián tiếp thể hiện đặc tính lỗ rỗng, tính thấm, độ mài mòn, …của bê tông. Từ số liệu về độ hút nước của Bảng 5 và Hình 6 chỉ ra rằng bê tông có thay thế 50 % tro bay (mẫu M1) sẽ có độ hút nước cao hơn so với mẫu đối chứng (M0). Điều này cũng phù hợp với kết quả cường độ chịu nén của mẫu M1 thấp hơn mẫu M0 ở sớm ngày tuổi do tro bay chưa phát huy được vai trò tăng cường độ ở độ tuổi sớm này. Khi hàm lượng sợi thép và sợi PP pha trộn vào bê tông càng tăng thì độ hút nước càng giảm do cấu trúc bê tông càng đặc chắc, cường độ nén, kéo càng cao khi hàm lượng sợi pha trộn càng tăng. Tất cả các giá trị độ hút nước của các mẫu bê tông cốt sợi đều rất thấp (< 1 %) rất phù hợp cho ứng dụng của bê tông cường độ cao trong nghiên cứu này.

4. Kết luận

Với nguồn nguyên vật liệu chủ yếu phía Nam, tro bay nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân và các sợi SF và sợi PP có thể chế tạo bê tông có cường độ nén chịu nén hớn hơn 60 MPa khá nhiều.

Việc thay thế 50 % xi măng bởi tro bay là một tỷ lệ thay thế khá lớn giúp giảm giá thành cho bê tông, hạn chế ô nhiễm môi trường do phế thải tro bay gây ra mà còn làm tăng độ linh động hỗn hợp bê tông, cải thiện cường độ muộn ngày cho bê tông.

Việc trộn sợi thép và sợi PP vào bê tông làm giảm độ linh động hỗn hợp bê tông nhưng lại làm tăng cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi ép chẻ, giảm độ hút nước của bê tông, cải thiện cơ tính và tăng độ bền cho bê tông.

Trong các tỷ lệ phối trộn sợi thép, sợi PP riêng lẻ và trộn hỗn hợp thì tỷ lệ trộn 0,75% SF và 0,75% PP là tỷ lệ khá tốt về nhiều yếu tố giúp giảm giá thành bê tông nhưng độ linh động, cường độ, độ hút nước đều ở mức rất tốt cho loại bê tông cường độ cao. Loại bê tông này có thể ứng dụng cho nhiều công trình xây dựng lớn, dùng thi công lớp phủ mặt cầu - đường, đường băng, bãi đỗ... vừa chống thấm, bền với khí hậu thời tiết của Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

[1]. C. Heidrich, H.-J. Feuerborn, A. Weir (2013), *Coal combustion products: a global perspective*, in: World of Coal Ash Conference.

[2]. TS. Nguyễn Thanh Bình (2007), *"Nghiên cứu chế tạo bê tông cốt sợi thép cường độ chịu uốn cao trong điều kiện Việt Nam",* Luận án TSKT, Viện KHCN Xây dựng, Hà Nội.

[3]. GS.TS Phạm Duy Hữu (2011), *Giáo trình vật liệu xây dựng,* Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.

[4]. ACI 211.1-91*, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.*

[5]. I. U.M. Bazenov, Bạch Đình Thiên, Trần Ngọc Tính (2004), *Công nghệ bê tông,* Nhà xuất bản Xây dựng.

[6]. Thomas, M. D. A. (2007), *Optimizing the use of fly ash in concrete*, volume 5420. Portland Cement Association Skokie, IL.

[7]. Bentz, D. P., Ferraris, C. F., Snyder, K. A. (2013), *Best Practices Guide for High-Volume Fly Ash Concretes: Assuring Properties and Performance,* Technical report, U.S. Department of Commerce.

[8]. Titarmare, A. P., Deotale, S. R. S., Bachale, S. B. (2012), *Experimental Study Report on Use of Fly Ash in Ready Mixed Concrete,* International Journal of Scientific & Engineering Research, 3:2–10.

[9]. TS. Trần Bá Việt (2008), *Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng cao sử dụng cốt sợi nhân tạo dùng cho các công trình ở Hà Nội*, Đề tài mã số TC–ĐT/5-04-03.

[10]. Vahid Afroughsabet, Togay Ozbakkaloglu (2015), *Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers,* Construction and Building Materials 94, page73–82.

[11]. TCVN 3118:1993*, Bê tông nặng - phương pháp xác định cường độ nén.*

[12]. GS.TS Phạm Duy Hữu (2008), *Giáo trình Bê tông tính cường độ cao và chất lượng cao,* Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.

[13]. S.P. Singh*, A.P. Singh (2010), *Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel–polypropylene hybrid fibres,* Asian journal of civil engineering vol.11, No 4.

[14]. TCVN 8862:2011*, Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chẻ của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính.*

[15]. TCVN 3113:2022*, Bê tông nặng - Phương pháp xác định độ hút nước*