

## Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến độ chống thấm nước và độ co ngót của bê tông

Lê Châu Tuấn<sup>1\*</sup>, Võ Bá Huy, Đinh Hoài Luân<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại Học Xây Dựng Miền Tây

### TỪ KHOÁ

Co ngót bê tông  
Độ chống thấm nước bê tông  
Bê tông tro bay

### TÓM TẮT

Bài báo này nhằm mục đích đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng tro bay (FA) đến cường độ và độ bền của bê tông xi măng. Trong nghiên cứu thực nghiệm này, các tính chất được kiểm tra là cường độ chịu nén (CĐCN), độ chống thấm nước và độ co ngót của bê tông. Với mục đích này, một hỗn hợp bê tông FA loại F đã được thiết kế với năm mức FA thay thế xi măng PCB40 (0%, 20%, 25, 30% và 35%). Kết quả thử nghiệm cho thấy, ở 28 ngày tuổi CĐCN của các bê tông FA 20 - 35% đều giảm so với mẫu đối chứng 0%, bê tông có liều lượng FA 20% - 30% có độ chống thấm cao hơn mẫu đối chứng, nhưng tăng lên 35% thì độ chống thấm bắt đầu giảm so với mẫu đối chứng. Ở 56 ngày tuổi, mẫu FA 20% có CĐCN cao hơn mẫu đối chứng khoảng 1,5%, các hỗn hợp còn lại đều giảm nhẹ so với mẫu đối chứng lần lượt là -1,1%, -3,3% và -6%, nhưng tất cả các hỗn hợp bê tông FA đều có khả năng chống thấm tốt hơn mẫu đối chứng. Về độ co ngót, qua kết quả thí nghiệm cho thấy ở 28 và 56 ngày tuổi, bê tông hàm lượng FA tăng thì độ co ngót càng giảm so với mẫu đối chứng và giảm gần như tuyến tính.

### KEYWORDS

Concrete shrinkage  
Concrete waterproofing  
Fly ash concrete

### ABSTRACT

This paper aims to evaluate the effect of fly ash (FA) content on the strength and durability of cement concrete. In this experimental study, the properties tested were compressive strength (CĐCN), water resistance and shrinkage of concrete. For this purpose, a type F FA concrete mix was designed with five levels of FA replacing cement PCB40 (0%, 20%, 25, 30% and 35%). The test results showed that at 28 days, the CĐCN of the FA 20 - 35% concretes decreased compared to the 0% control sample, the concrete with FA dosage of 20% - 30% had higher water resistance than the control sample, but when it increased to 35%, the water resistance began to decrease compared to the control sample. At 56 days old, the 20% FA sample had a higher CĐCN than the control sample by about 1,5%, the remaining mixtures were slightly lower than the control sample by -1,1%, -3,3% and -6% respectively, but all FA concrete mixtures had better waterproofing ability than the control sample. Regarding shrinkage, the experimental results showed that at 28 and 56 days old, the concrete with increased FA content had a decrease in shrinkage compared to the control sample and decreased almost linearly.

### 1. Giới thiệu

Các công trình giao thông như đường bộ, cầu cống, bề mặt bê tông thường tiếp xúc với nước, nhiệt độ thay đổi, hóa chất, tác động cơ học, ... Do đó, ngoài cường độ, độ chống thấm và độ co ngót là những chỉ tiêu rất quan trọng để đảm bảo độ bền lâu dài, hạn chế nứt, sự thấm thấu của nước và các hóa chất gây ăn mòn cốt thép. Tro bay (FA) được sử dụng như phụ gia khoáng để thay thế một phần xi măng, với các ưu điểm như giảm nhiệt thủy hóa, cải thiện độ làm việc, tối ưu cấu trúc mao mạch, giảm chi phí xi măng, giảm phát thải [1-7]. Tuy nhiên, khi sử dụng tro bay thì các tác động lên độ thấm và co ngót vẫn còn nhiều điểm cần làm rõ, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới và nguyên vật liệu địa phương ở Việt Nam.

Về khả năng chống thấm, nhiều tác giả như A. M. Rashad và cộng sự [1], Chindapasirt và cộng sự [2], Md. Moinul Islam và cộng sự [3]

cho thấy FA có hoạt tính pozzolanic, phản ứng với  $Ca(OH)_2$  sinh ra trong quá trình thủy hoá xi măng để tạo thêm các sản phẩm C-S-H, làm giảm độ rỗng mao quản, cải thiện vi cấu trúc và từ đó tăng khả năng chống thấm của bê tông. Saha [4] đã chứng minh rằng khả năng hấp phụ của bê tông giảm đáng kể khi liều lượng FA và thời gian bảo dưỡng tăng lên. Ở mức thay thế FA 10, 20, 30 và 40 %, khả năng hấp phụ của bê tông trộn là 96, 87, 71 và 68 % so với bê tông đối chứng.

Đối với độ co của bê tông, kết quả nghiên cứu cho thấy FA ảnh hưởng đến cả độ co ngót khô và co ngót do từ biến [1- 2]. Do phản ứng pozzolanic diễn ra chậm, bê tông chứa FA thường có tốc độ phát triển cường độ chậm hơn ở giai đoạn đầu nhưng bền vững hơn về sau. Sự thay thế FA có xu hướng làm giảm nhiệt thủy hoá và giảm ứng suất nhiệt, từ đó hạn chế nguy cơ nứt sớm. Tuy nhiên, ở một số tỷ lệ thay thế cao (> 40 %), nếu không kiểm soát tốt tỷ lệ nước/ni măng và điều kiện bảo dưỡng, độ co ngót khô có thể tăng nhẹ do sự

\*Liên hệ tác giả: lechautuan@mtu.edu.vn

Nhận ngày 13/10/2025, sửa xong ngày 04/11/2025, chấp nhận đăng ngày 22/12/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1137>

hình thành lỗ rỗng mịn. Theo Yang và cộng sự [5] chiều rộng vết nứt và co ngót tự do của bê tông giảm khi hàm lượng FA tăng. Theo Saha [4], tốc độ thủy hóa thấp do hàm lượng vôi thấp trong bê tông FA loại F đã khiến độ co ngót khô trong bê tông FA giảm dần.

Do đó, nghiên cứu cho thấy việc sử dụng FA trong bê tông có thể cải thiện các đặc tính độ bền, nhưng mức độ cải thiện phụ thuộc vào tỷ lệ phối liệu và tính chất của FA. Mục tiêu của nghiên cứu này là so sánh cường độ nén, độ co ngót và độ chống thấm nước của bê tông FA loại F có độ mịn khá thấp thay thế xi măng từ 20 % đến 35 % với bê tông xi măng Portland PCB40 (làm mẫu đối chứng).

## 2. Chương trình thí nghiệm

### 2.1. Nguyên liệu thô

Các vật liệu được sử dụng trong thí nghiệm này bao gồm chất kết dính là xi măng PCB40 Hà Tiên, FA xuất sứ từ nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải (Trà Vinh), cốt liệu mịn là cát sông Tiền, cốt liệu thô là đá dăm tự nhiên xuất xứ từ mỏ đá Tradico (An Giang), nước được lấy từ nước sinh hoạt. Tất cả đều được thí nghiệm đạt theo TCVN và được thể hiện Bảng 1 và 2.

**Bảng 1.** Tính chất vật lý cơ bản của cốt liệu thô và cốt liệu mịn.

Tính chất vật lý	Đơn vị	Đá 5x20	Cát vàng
Kích thước cốt liệu tối đa	mm	5-20	0-2,5
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,734	2,624
Khối lượng thể tích xốp	g/cm <sup>3</sup>	1,505	1,545
Độ ẩm vật liệu	%	0,550	1,830
Mô đun độ lớn			1,960

**Bảng 2.** Thành phần hóa học của xi măng và FA.

Chi tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Xi măng	FA
Độ mịn	cm <sup>2</sup> /g	4.180	3.050
Thời gian đông kết			
- Bắt đầu	Phút	145	
- Kết thúc	Phút	235	
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	3,10	2,28
Cường độ nén	MPa		
- 3 ngày ± 2h		22,0	
- 28 ngày ± 2h		43,5	
Tỷ lệ lưu động			98,6
Độ ẩm	%		0,21
Hàm lượng MgO	%	2,0	1,11
Hàm lượng CaO	%	59,9	1,75
Hàm lượng (SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	33,2	85,15
Hàm lượng SO <sub>3</sub>	%	2,07	0,08
Hàm lượng mất khi nung	%	1,92	6,46

### 2.2. Thiết kế hỗn hợp thử nghiệm

Để phân tích ảnh hưởng của hàm lượng FA đến CĐCN, độ thấm nước và độ co ngót của bê tông. Một hỗn hợp bê tông được thiết kế theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9340: 2012 [6], bao gồm một hỗn hợp đối chứng và bốn hỗn hợp với FA chiếm 20 %, 25 %, 30 % và 35 % tổng chất kết dính (xi măng + FA), các cốt liệu thô, cốt liệu mịn và lượng nước không thay đổi được thể hiện trong Bảng 3.

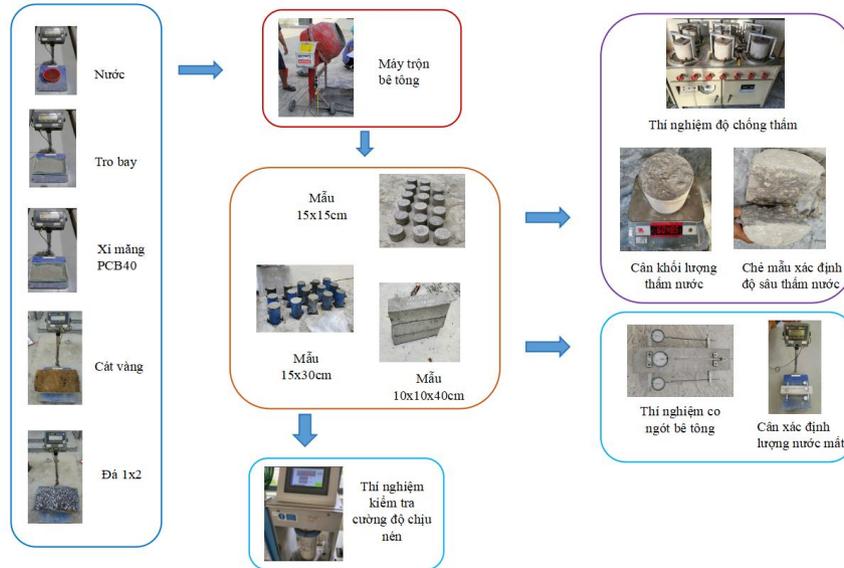
**Bảng 3.** Thành phần cấp phối cho bê tông (tính cho 1m<sup>3</sup>).

Ký hiệu	Xi măng (kg)	FA (kg)	Cát vàng (kg)	Đá (5x20)mm (kg)	Nước (lít)
FA0	350	-	590	1.210	175
FA20	280	70	590	1.210	175
FA25	263	88	590	1.210	175
FA30	245	105	590	1.210	175
FA35	228	123	590	1.210	175

### 2.3. Chuẩn bị mẫu thử, số lượng mẫu và phương pháp thử nghiệm

Bê tông sẽ được trộn trong máy trộn bê tông sau khi thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lí của vật liệu thô. Tổng cộng có 30 mẫu bê tông hình trụ kích thước 150 x 300 mm được đúc để kiểm tra cường độ nén theo TCVN 3118:2022 [7] sau khi được bảo dưỡng bê tông trong 28 ngày và 56 ngày. Đối với thử nghiệm co ngót, 15 mẫu bê tông hình lăng trụ kích thước 100 x 100 x 400 mm được đúc và sau 24 h được tháo khuôn cẩn thận và ngay lập tức được đặt vào thiết bị kiểm tra độ co ngót tự nhiên ở giai đoạn đầu. Các mẫu vật co ngót không được xử lý bằng nước và được bảo quản trong buồng có kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm, duy trì ở nhiệt độ (27 ± 2) °C và độ ẩm tương đối (60 ± 5) % theo TCVN 3117:2022 [8].

Thử nghiệm độ chống thấm nước của bê tông dưới áp lực theo tiêu chuẩn TCVN 3116:2022 [9]. Sau 28 ngày bảo dưỡng, mẫu thử hình trụ 150 x 150 mm sẽ được đặt trong phòng thí nghiệm 24 h trước khi thử. Bề mặt trên và dưới của mẫu thử phải được làm sạch lớp hồ xi măng. Mỗi tổ mẫu có sáu mẫu. Tất cả hỗn hợp bê tông được thử với cùng mức độ chống thấm nước W10 (chịu áp lực 1,0 MPa) để so sánh tác động của hàm lượng FA đối với khả năng chống thấm của bê tông. Áp lực nước tăng 0,2 MPa mỗi cấp. Thời gian giữ áp lực ở mỗi cấp là 16 h, thời gian tăng áp trong khoảng từ một phút đến năm phút.



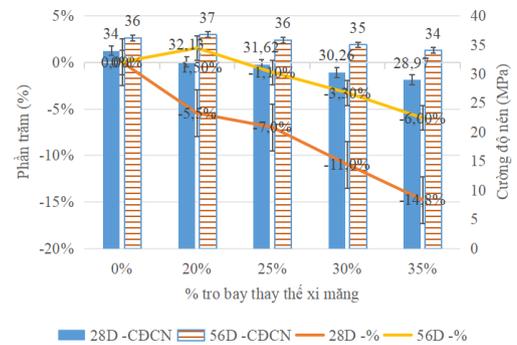
Hình 1. Biểu đồ tổng quát chương trình thí nghiệm.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Kết quả thử nghiệm cường độ chịu nén

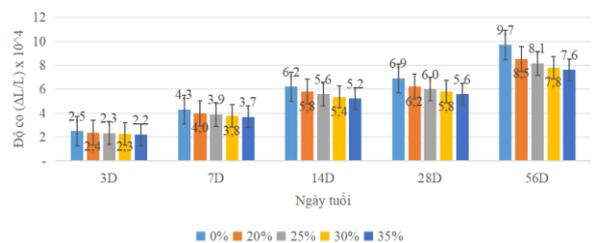
Cường độ nén trung bình của ba mẫu bê tông hình trụ 150 x 300 mm trong các thời gian bảo dưỡng khác nhau được trình bày trong Hình 1. Có thể thấy rằng, các mẫu đối chứng không có FA thể hiện cường độ nén cao, đạt 34 MPa sau 28 ngày bảo dưỡng. Cường độ nén tăng 5,8 % cho đến ngày thứ 56 bảo dưỡng và đạt 36 MPa. Tuy nhiên, việc bổ sung FA làm giảm cường độ nén của bê tông. Khi tăng thể tích FA loại F, việc thiếu hàm lượng vôi trong hỗn hợp dẫn đến cường độ nén thấp. FA trong bê tông làm giảm tốc độ thủy hóa, do đó cường độ nén thấp. Sau 28 ngày bảo dưỡng, CĐCN đạt lần lượt là 32, 31,6, 30,2 và 28,9 MPa đối với các mẫu có hàm lượng FA lần lượt là 20 %, 25 %, 30 % và 35 %, giảm lần lượt đạt 5,5 %, 7,8 %, 11 % và 14,8 % so với bê tông đối chứng, riêng đối với hàm lượng tro bay 35 % CĐCN đã giảm đi một cấp. Đáng chú ý là, khi hàm lượng FA tăng lên, cường độ nén ban đầu của bê tông giảm dần, điều này phù hợp với các phát hiện trước đây [1-3],[10]. Việc thay thế FA là phải trả giá bằng việc sử dụng ít xi măng hơn. Sự giảm cường độ nén rõ rệt hơn khi sử dụng tỷ lệ phần trăm FA có độ mịn thấp (3.050 cm<sup>2</sup>/g) làm chất thay thế xi măng có độ mịn cao (4.180 cm<sup>2</sup>/g) [2]. Mức FA thay thế cho thấy sự thay đổi đáng kể về tốc độ tăng trưởng cường độ của các mẫu. Các mẫu FA 20 % cho thấy sự cải thiện rõ rệt về cường độ nén từ ngày thứ 28 đến ngày thứ 56 bảo dưỡng, CĐCN đạt 36,8 MPa tăng 14,4 % và tăng 1,5 % so với mẫu đối chứng đạt 36,2 MPa. Mặt khác, các mẫu có 25 %, 30 % và 35 % FA cho thấy cường độ cũng tăng nhanh từ 28 đến 56 ngày bảo dưỡng, đạt 35,8 MPa, 35 MPa, 34 MPa, tăng lần lượt là 13,3 %, 15,7 %, 17,5 %. Tuy nhiên, mức tăng vẫn thấp hơn so với mẫu đối chứng ở 56 ngày bảo dưỡng, giảm lần lượt là 1,1 %, 3,3 %, 6 %. Điều này lí giải là khi tăng hàm lượng FA thường dẫn đến tăng hàm lượng các hợp chất như SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> và

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Do đó, khi thời gian bảo dưỡng tăng lên các hợp chất như vậy phản ứng với Ca(OH)<sub>2</sub> để tạo ra nhiều canxi-silicat-hydrat (C-S-H) và canxi hydrat (CH), giúp cải thiện đáng kể mật độ của cấu trúc vi mô bê tông bằng cách giảm cấu trúc lỗ rỗng nhỏ [1]. Tuy nhiên, do phản ứng pozzolanic, Ca(OH)<sub>2</sub> được chuyển thành gel C-S-H thứ cấp khi FA được thêm vào hỗn hợp như một chất thay thế cho xi măng. Hàm lượng FA không tham gia đầy đủ vào quá trình phản ứng hóa học trong trường hợp hàm lượng FA được tăng lên quá mức [1], [2].

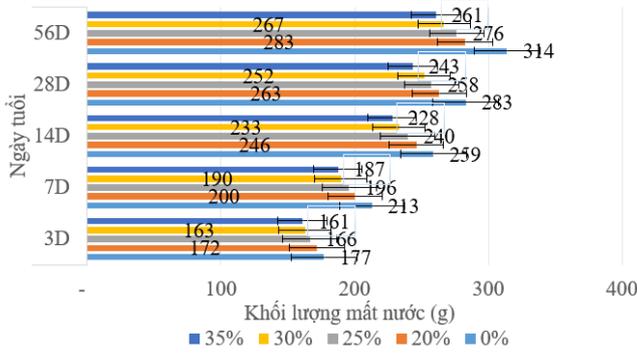


Hình 3. Biểu đồ so sánh CĐCN của nhóm tổ mẫu.

#### 3.2. Kết quả thử nghiệm co ngót



Hình 4. Biểu đồ thể hiện khối lượng mất nước ở các ngày tuổi.



**Hình 5.** Biểu đồ thể hiện cơ ngót của các mẫu bê tông FA qua các ngày tuổi.

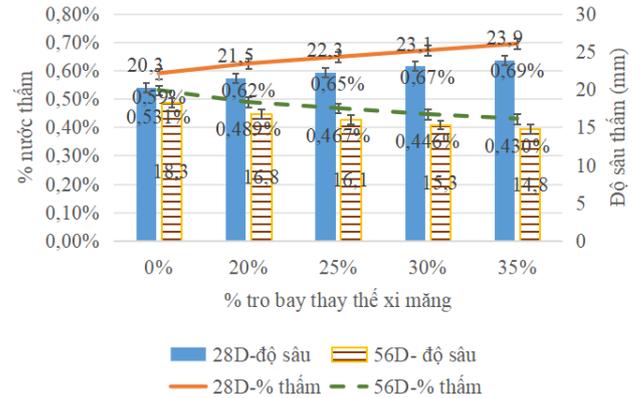
Hình 4 cũng chỉ ra rằng liều lượng FA ảnh hưởng đáng kể đến độ co ngót tự nhiên phát triển. FA không chỉ có thể làm giảm sự co rút tự nhiên lâu dài, nhưng cũng làm giảm hiệu quả sự co rút tự nhiên ở tuổi sớm co ngót. Theo kết quả thí nghiệm, gần 5 %, 7,5 %, 9 % và 12 % của tự sinh ba ngày, gần 7 %, 9,5 %, 12 % và 14,6 % của tự sinh bảy ngày, độ co ngót được giảm bớt nhờ việc bổ sung lần lượt 20 %, 25 %, 30 % và 35 % FA.

Việc bổ sung FA làm giảm rõ rệt độ co ngót khô của bê tông FA thủy hóa giữa ngày thứ 28 và ngày thứ 56, và độ co ngót khô giảm rõ rệt khi tăng liều lượng FA. Cụ thể, việc bổ sung 20 %, 25 %, 30 % và 35 % FA đã làm giảm độ co ngót khô ở ngày thứ 28 lần lượt khoảng 10 %, 13 %, 16 % và 19 % so với bê tông mẫu đối chứng. Đến ngày thứ 56 mức giảm lần lượt là 12 %, 16 %, 19,5 % và 22,5 %. Kết quả này cũng phù hợp với các nghiên cứu trước đây [2], [4], [11], [12], [13]. Nghiên cứu của Khatib [14] cho thấy có sự giảm co ngót khô một cách có hệ thống khi hàm lượng FA tăng lên và mối quan hệ giữa co ngót khô ở ngày thứ 56 và hàm lượng FA là tuyến tính.

Tương tự như độ co ngót, mất mát khối lượng nước tỷ lệ thuận với độ co ngót, khi độ co ngót càng nhiều thì mất mát khối lượng nước càng nhiều (Hình 5).

Hiệu ứng giảm co ngót tự nhiên do bổ sung FA có thể được giải thích bởi hai lý do sau. Một là hiệu ứng pha loãng của FA. Xem xét tính trơ bản chất của FA ở độ tuổi sớm, cũng như không có sự mất nước trong quá trình tự sinh thử nghiệm co ngót, hàm lượng xi măng trong bê tông đóng vai trò chủ yếu trong việc xác định co ngót tự sinh [1], [15], [16]-[17]. Việc bổ sung FA làm giảm hàm lượng xi măng theo tỷ lệ, dẫn đến lượng nước tiêu thụ ít hơn trong quá trình hydrat hóa quá trình. Kết quả là, áp suất mao dẫn và khả năng tự khô của bê tông có thể được cải thiện hiệu quả sau khi bổ sung FA, làm giảm sự co ngót tự nhiên [17]. Lý do khác là phản ứng pozzolan của FA, có thể cải thiện cấu trúc lỗ rỗng của bê tông, đặc biệt là ở độ tuổi dài hạn. Lưu ý rằng phản ứng pozzolan của FA sẽ tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng và giảm kích thước lỗ rỗng của bê tông và do đó làm giảm sự co ngót tự nhiên của bê tông. Dựa trên những lý do đã đề cập ở trên, bê tông có liều lượng FA cao hơn cho thấy khả năng giảm co ngót tự nhiên lớn hơn [15].

**3.3. Kết quả thử nghiệm độ chống thấm nước**



**Hình 6.** Ảnh hưởng của hàm lượng FA đến độ thấm và tính chất cơ học của bê tông thấm.

Hình 6 cho thấy các giá trị trung bình của độ sâu thấm nước dưới áp suất đối với từng hỗn hợp. Bê tông tham chiếu - không có FA, được đặc trưng bởi độ sâu thấm nước dưới áp suất - trung bình là 20,3 mm sâu vào mẫu ở 28 ngày tuổi, chiếm 0,59 % theo khối lượng (tỷ lệ % được tính bằng cách lấy khối lượng mẫu sau thí nghiệm trừ đi khối lượng mẫu trước thí nghiệm và chia cho khối lượng trước thí nghiệm). Độ sâu thấm trong bê tông FA 20 %, 25 %, 30 % và 35 % trung bình lần lượt là 21,5 mm, 22,3 mm, 23,1 mm và 23,9 mm. Kết quả thử nghiệm cho thấy bê tông FA có khả năng chống thấm nước thấp hơn so với bê tông PCB40 ở tuổi 28 ngày. Cụ thể, các mẫu bê tông FA 20 %, 25 %, 30 % và 35 % ở tuổi 28 ngày, độ thấm tăng so với mẫu đối chứng lần lượt là 5,9 %, 9,9 %, 13,8 % và 17,7 %. Nguyên nhân là do lượng xi măng giảm và phản ứng pozzolan chưa phát huy hết nên làm giảm khả năng kháng thấm (tức tăng độ thấm/độ xâm nhập nước) so với đối chứng [18].

Mặt khác, kết quả thử nghiệm cũng cho thấy, sau 56 ngày bảo dưỡng, độ sâu thấm của bê tông không sử dụng FA trung bình là 18,3 mm, giảm khoảng 10 % so với bê tông ở 28 ngày tuổi. Bên cạnh đó, sau thời gian bảo dưỡng 56 ngày, bê tông FA cho thấy khả năng chống thấm nước cao hơn so với bê tông PCB40, các giá trị độ sâu thấm thấp 16,8 mm, 16,1 mm, 15,3 mm và 14,8 mm giảm lần lượt là 8 %, 12 %, 16 %, và 19 % đối với bê tông FA 20 %, 25 %, 30 % và 35 % so với mẫu đối chứng. Kết quả này tương đối phù hợp với các nghiên cứu trước đây [18]-[20]. Thông qua hoạt động pozzolan, FA kết hợp hóa học với nước và canxi hydroxit, nó tạo thành gel C-S-H thứ cấp lấp đầy tất cả các lỗ rỗng bên trong mẫu bê tông, làm cho bê tông đặc và chặt, cường độ cao hơn. Canxi hydroxit kết hợp hóa học với FA không bị rửa trôi, do đó giúp duy trì mật độ cao. Kết quả là các lỗ rỗng siêu nhỏ trong bê tông tiếp tục bị chia nhỏ thành các lỗ rỗng mao dẫn có kích thước ngày càng nhỏ hơn. Nhiều lỗ rỗng siêu nhỏ mất kết nối theo thời gian. Việc giảm kích thước lỗ rỗng cùng với việc mất kết nối lỗ rỗng dẫn đến sự giảm dần đáng kể độ thấm [5, 14].

#### 4. Kết luận

Năm hỗn hợp bê tông đã được nghiên cứu để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng FA loại F thay thế xi măng đến cường độ và độ bền của bê tông cho đến 56 ngày tuổi. Kết quả thử nghiệm rút ra những kết luận sau:

✓ Sau 28 ngày bảo dưỡng, CĐCN giảm khi xi măng được thay thế một phần bằng FA mà không điều chỉnh tỷ lệ khối lượng/chất rắn. Sau 56 ngày bảo dưỡng thì CĐCN của bê tông FA 20 % cao hơn mẫu đối chứng, các hỗn hợp còn lại vẫn thấp hơn so với mẫu đối chứng.

✓ Tro bay trong bê tông làm giảm độ co ngót khi khô có sự giảm co ngót khô một cách có hệ thống khi hàm lượng FA tăng lên và mối quan hệ giữa co ngót khô ở ngày thứ 56 và hàm lượng FA là tuyến tính.

✓ Việc bổ sung tro bay làm giảm khả năng chống thấm của bê tông ở giai đoạn đầu 28 ngày tuổi nhưng làm tăng khả năng chống thấm sau 56 ngày tuổi.

✓ Theo quy định của TCVN nghiệm thu bê tông ở 28 ngày tuổi, do đó việc vừa đảm bảo cường độ, vừa đảm bảo độ co ngót và khả năng chống thấm nước ít. Kiến nghị nên sử dụng liều lượng FA < 30 % để thay thế xi măng là thích hợp.

#### Lời cảm ơn

Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu thuộc nhiệm vụ khoa học năm 2024–2025 do Trường Đại học Xây dựng Miền Tây chủ trì. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn nhà Trường đã tạo điều kiện thuận lợi để nhóm hoàn thành nghiên cứu này.

#### Tài liệu tham khảo

[1]. A. M. Rashad *et al.*, “Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 34, no. 28, pp. 25–31, 2018, doi: 10.1016/j.clema.2022.100143.

[2]. P. Chindaprasirt, S. Homwuttivong, and V. Sirivivatnanon, “Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 7, pp. 1087–1092, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.021.

[3]. M. M. I. and M. S. Islam, “Effect of Fly Ash on Water Permeability and Strength of,” *Int. Conf. Mech. Engineering Renew. Energy 2011*, vol. 2011, no. December, pp. 22–24, 2011.

[4]. A. K. Saha, “Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete,” *Sustain. Environ. Res.*, vol. 28, no. 1, pp. 25–31, 2018, doi: 10.1016/j.serj.2017.09.001.

[5]. E. H. Yang, Y. Yang, and V. C. Li, “Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness,” *ACI Mater. J.*, vol. 104, no. 6, pp. 620–628, 2007, doi: 10.14359/18966.

[6]. V. N. Bộ Khoa học và Công nghệ, “TVCN 9340:2012: Hỗn hợp bê tông trộn sẵn – Yêu cầu cơ bản đánh giá chất lượng và nghiệm thu,” 2012.

[7]. Bộ Khoa Học và Công Nghệ, “TCVN 3118:2022 Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén,” 2022.

[8]. Bộ Khoa Học và Công Nghệ, “TCVN 3117:2022 Bê tông - Phương pháp xác định độ co,” 2022.

[9]. Bộ Khoa Học và Công Nghệ, “TCVN 3116:2022 Bê tông - Phương pháp xác định độ chống thấm nước - phương pháp vết thấm,” 2022.

[10]. R. A. Hawileh, S. K. Shaw, M. Assad, A. Dey, J. A. Abdalla, and J. H. Kim, “Influence of Fly Ash on the Compressive Strength of Ultrahigh-Performance Concrete: A State-of-the-art Review Towards Sustainability,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 19, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s40069-024-00757-x.

[11]. X. W. Peter Taylor, “Factors Influencing Drying Shrinkage,” *Concr. Pavement Mix. Des. Anal.*, vol. 00011, no. October, pp. 1–29, 2014.

[12]. Z. Li, J. Liu, and G. Ye, “Drying shrinkage of alkali-activated slag and fly ash concrete; A comparative study with ordinary Portland cement concrete,” *Heron*, vol. 64, no. 1–2, pp. 149–163, 2019.

[13]. Y. Zhang *et al.*, “Shrinkage, Creep, and Thermal Effects: A Review,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 2288, pp. 1–19, 2024.

[14]. J. M. Khatib, “Performance of self-compacting concrete containing fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 9, pp. 1963–1971, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011.

[15]. L. Wang, Z. Yu, B. Liu, F. Zhao, S. Tang, and M. Jin, “Effects of Fly Ash Dosage on Shrinkage, Crack Resistance and Fractal Characteristics of Face Slab Concrete,” *Fractal Fract.*, vol. 6, no. 6, 2022, doi: 10.3390/fractalfract6060335.

[16]. D. K. Nayak, P. P. Abhilash, R. Singh, R. Kumar, and V. Kumar, “Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies,” *Clean. Mater.*, vol. 6, no. September, p. 100143, 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100143.

[17]. X. Hu, C. Shi, Z. Shi, B. Tong, and D. Wang, “Early age shrinkage and heat of hydration of cement-fly ash-slag ternary blends,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 857–865, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.138.

[18]. L. Wang *et al.*, “The Influence of Fly Ash Dosages on the Permeability, Pore Structure and Fractal Features of Face Slab Concrete,” *Fractal Fract.*, vol. 6, no. 9, 2022, doi: 10.3390/fractalfract6090476.

[19]. M. Abdel-jaber, A. Senouci, and A. A. Taqa, “Concrete Permeability and Mechanical Properties,” *Buildings*, vol. 13, no. 1927, 2023.

[20]. Z. Qu and X. Hu, “Experimental Study on Mechanics and Permeability of Fly Ash Permeable Concrete,” *Highlights Sci. Eng. Technol.*, vol. 96, pp. 198–203, 2024, doi: 10.54097/ge6fn379.

[21]. Nguyễn Trọng Lâm, Nguyễn Ngọc Linh, Trần Văn Nam, Vũ Duy Kiên, Trần Văn Khải, Phùng Đức Hiếu, “Ảnh hưởng của tro bay thay thế một phần xi măng đến tính chất của bê tông thương phẩm,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE*. 14 (4V): 96–105, 2020.

[22]. Nghiep Quoc Pham, Kien Anh Le, “Coal fly ash in vietnam and its application as a lightweight material,” *Chemical Engineering Transactions*, VOL. 83, 2021.

[23]. Nguyễn Thanh Bằng, Nguyễn Tiến Trung, Đinh Hoàng Quân, “Nghiên cứu đánh giá chất lượng tro bay, xi lò cao của các nhà máy nhiệt điện và luyện kim ở việt nam,” *Tạp Chí Khoa Học Và Công Nghệ Thủi Lợi*, SỐ 57 - 2019.

[24]. Tống Tôn Kiên, “Ảnh hưởng của loại và hàm lượng tro bay cao đến cường độ và tính thấm của bê tông cường độ cao,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN*, 17 (2V): 108–122, 2023.

[25]. Nguyễn Văn Chính, Đặng Công Thuật, “Ảnh hưởng của tro bay, silicafume và môi trường dưỡng hộ đến cường độ chịu nén của bê tông,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE*, 14 (3V): 60–72, 2020.