

# ẢNH HƯỞNG CỦA LOẠI VÀ HÀM LƯỢNG TRO BAY CAO ĐẾN CƯỜNG ĐỘ VÀ TÍNH THẨM CỦA BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO

Tổng Tôn Kiên<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

*Nhận ngày 09/02/2023, Sửa xong 14/3/2023, Chấp nhận đăng 16/3/2023*

## Tóm tắt

Nghiên cứu này đánh giá việc sử dụng hai loại tro bay nhiệt điện sử dụng công nghệ đốt tầng sôi tuần hoàn (CFB) và đốt than phun (PC), với hàm lượng cao 40, 50, 60 và 70% thay thế xi măng đến cường độ và tính thấm của bê tông cường độ cao (BCĐC). Kết quả nghiên cứu cho thấy cường độ nén của bê tông sử dụng tro bay cao (HVFAC) thấp hơn cường độ nén của bê tông đối chứng ở tuổi ngắn ngày. Tuy nhiên nhờ vào phản ứng puzolan, cường độ nén của bê tông sử dụng tro bay đã dần được cải thiện ở tuổi dài ngày (sau 90 ngày). Thậm chí mẫu bê tông sử dụng 40 và 50% tro bay PC còn có cường độ nén đạt cao hơn 9,1% và 12,3% so với cường độ nén của mẫu bê tông đối chứng khi ở tuổi 365 ngày. Việc sử dụng 40-60% tro bay thay thế xi măng cũng đã làm giảm thể tích lỗ rỗng thấm nước, độ hút nước mao quản và độ thấm ion clo trong bê tông ở tuổi dài ngày. Các giá trị này giảm mạnh đối với bê tông sử dụng tro bay PC, nhưng giảm nhẹ đối với bê tông sử dụng tro bay CFB khi bảo dưỡng trong khoảng 28-365 ngày.

*Từ khóa:* bê tông cường độ cao - HSC; tro bay - FA; bê tông hàm lượng tro bay cao - HVFAC; độ rỗng thấm nước; hệ số hút nước; độ thấm ion clo.

## EFFECT OF TYPE AND HIGH-VOLUME FLY ASH ON THE STRENGTH AND PERMEABILITY PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE

### Abstract

This study evaluated the use of two types of thermoelectric coal fly ash using circulating fluidized bed (CFB) and pulverized combustion (PC) technology, with high contents of 40, 50, 60 and 70% replacing cement to the strength and permeability properties of high-strength concrete (HSC). Research results showed that the compressive strength of the high-volume fly ash concrete (HVFAC) are lower than that of the control concrete at short-term ages. However, thanks to the pozzolanic reaction, the compressive strength has gradually improved over the long term (after 90 days). Even concrete samples using 40 and 50% PC fly ash also had a compressive strength higher 9.1% and 12.3% compared to the compressive strength of the control concrete at 365 days. The use of 40-60% fly ash in combination with cement has also reduced permeable voids, lower capillary water absorption and chlorine ion permeability than the control concrete sample in long-term curing. These values drop sharply within concrete using PC but lighten in CFB concrete that is cured for 28-365 days.

*Keywords:* high strength concrete - HSC; fly ash - FA; high volume fly ash concrete - HVFAC; permeable void; water sorptivity; chloride permeability.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(2V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(2V)-08) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Bê tông là một trong những loại vật liệu xây dựng phổ biến nhất trên trái đất. Tuy nhiên, sản xuất bê tông cần lượng lớn các nguồn vật liệu tự nhiên và việc sản xuất xi măng làm phát sinh lượng lớn

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [kientt@nuce.edu.vn](mailto:kientt@nuce.edu.vn) (Kiên, T. T.)

khí thải CO<sub>2</sub> và các loại khí khác gây hiệu ứng nhà kính [1, 2]. Do đó, nhiều nghiên cứu đã thử nghiệm và đánh giá khả năng sử dụng các loại vật liệu phế thải để thay thế xi măng nhằm tăng hiệu quả bền vững và giảm giá thành sản xuất bê tông [3–5]. Trong khi đó, lượng tro bay phát sinh từ các nhà máy nhiệt điện đốt than ngày càng lớn mà chưa được tận dụng triệt để. Trung bình, để sản xuất 1 kW điện thì cần đốt tới 0,51 kg than [6], tạo ra khoảng 0,122 kg tro bay và 0,031 kg xỉ đáy [7]. Tro bay đã được sử dụng rộng rãi trong sản xuất xi măng và bê tông chủ yếu nhờ vào khả năng puzolan và giảm nhiệt lượng thủy hóa [7–9]. Cho nên, tro bay đã và đang được tận dụng không chỉ nhằm giảm lượng tiêu thụ xi măng và hạ giá thành bê tông, mà còn hạn chế chi phí xử lý và diện tích bãi chôn lấp [4, 7]. Tùy thuộc vào loại nhiên liệu than sử dụng và công nghệ đốt khác nhau (công nghệ đốt tầng sôi tuần hoàn-CFB và công nghệ đốt than phun - PC), tro bay sẽ có các đặc tính và sự ảnh hưởng khác nhau đến tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông [9, 10]. Tro bay PC thường có hạt dạng hình cầu có khả năng tạo hiệu ứng ổ bi sẽ làm tăng độ đặc chắc, tính dẻo của CKD và hỗn hợp bê tông [11]. Loại tro này thường có hoạt tính cao hơn tro bay CFB do CFB thường sử dụng than có nhiệt trị thấp và hàm lượng lưu huỳnh cao, nhiệt độ đốt thấp (800-900 °C) nên phần lớn vật liệu không cháy trong than chưa bị nóng chảy [7]. Các hạt tro bay CFB thường có hình dạng góc cạnh, tỷ diện tích bề mặt lớn và có độ rỗng xốp lớn nên lượng nước trộn trong hỗn hợp bê tông cần lớn hơn so với khi sử dụng tro bay PC [7, 12]. Vì vậy, việc nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của loại và hàm lượng tro bay đến tính chất bê tông trước khi sử dụng là cần thiết.

Khi sử dụng tro bay có thể làm giảm hiện tượng phân tầng tách nước và cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông [4], giảm cường độ ở tuổi sớm nhưng tăng cường độ ở tuổi muộn của bê tông [9], thay đổi tính thấm và ảnh hưởng đến độ bền của bê tông [13]. Supit và Shaikh [14] đã chỉ ra rằng việc đưa tro bay vào bê tông đã làm giảm thể tích lỗ rỗng thấm nước 6-11% so với bê tông thường. Hơn nữa, sự ảnh hưởng của hàm lượng tro bay khác nhau đến lỗ rỗng thấm nước là khác nhau. Mardani-Aghabaglou và cs. [15] lại cho rằng bê tông sử dụng tro bay có độ rỗng thấm nước cao hơn so với các mẫu đối chứng và độ rỗng tăng lên khi hàm lượng tro tăng lên. Nhưng Gopalan M.K. [16], Haque M.N. và Kayaly O. [17] lại cho rằng tro bay làm giảm tính thấm của lớp đá xi măng cũng như vùng giao diện chuyển tiếp xung quanh các hạt cốt liệu. Do đó hệ số hút nước của bê tông sẽ giảm. Wang và cs. [18] đã chứng minh rằng tro loại F có hiệu quả nhất trong việc giảm tính thấm ion clo của bê tông, nhưng mức độ giảm còn tùy thuộc vào độ mịn và hàm lượng tro bay sử dụng [19]. Mặc dù tro bay đã được nhiều nghiên cứu thực hiện, nhưng vẫn có một số kết quả trái ngược nhau về tính thấm của bê tông. Các tính chất hóa lý của tro bay chủ yếu tùy thuộc vào loại than và công nghệ đốt cho nên ảnh hưởng lớn đến đặc tính cơ học và độ bền của bê tông.

Bê tông cường độ cao (BCĐC) đã và đang được sử dụng phổ biến trong xây dựng hiện đại với nhiều ưu điểm vượt trội như sự phát triển cường độ nhanh, cho cường độ và khả năng chịu lực lớn, từ đó cho phép giảm kích thước cấu kiện và khối lượng bê tông sử dụng, kèm theo rút ngắn tiến độ thi công. Bên cạnh đó, độ bền và khả năng chống ăn mòn, chống thấm của BCĐC lớn sẽ cho phép kéo dài tuổi thọ kết cấu bê tông và công trình. Tuy nhiên, hầu hết các cấp phối hỗn hợp BCĐC sử dụng lượng dùng xi măng lớn hoặc sử dụng CKD hỗn hợp giữa xi măng và silica fume [20]. Việc bổ sung silica fume có lợi về độ bền và cường độ, nhưng hỗn hợp bê tông khá dính quánh, khó thi công [5]. Do đó, cần tăng lượng lớn phụ gia hóa dẻo để đảm bảo tính công tác và khả năng vận chuyển, thi công của hỗn hợp bê tông. Hơn nữa tại Việt Nam, silica fume phải nhập khẩu và có giá thành cao hơn nhiều so với xi măng cho nên giá thành BCĐC cũng tăng lên rất cao, khó ứng dụng cho các kết cấu công trình phổ thông. Trong khi đó lượng tro bay nhiệt điện phát sinh ở Việt Nam khá lớn mà chưa được tận dụng triệt để [7, 21]. Do đó, việc phát triển BCĐC sử dụng tro bay hàm lượng cao để thay thế silicafume là một giải pháp khả thi, đem lại “lợi ích kép” không những giảm giá thành, tăng tính

bền vững và tăng cường khả năng ứng dụng của BCĐC, mà còn giảm lượng tro bay thải ra các bãi chứa của nhà máy nhiệt điện đốt than ở Việt Nam.

Xuất phát từ những thực tế trên, nghiên cứu này tập trung đánh giá việc sử dụng tro bay nhiệt điện từ hai công nghệ CFB và PC, với hàm lượng 40, 50, 60 và 70% thay thế xi măng đến cường độ nén và tính thấm của BCĐC. Để đánh giá tính thấm của bê tông, nghiên cứu đã xác định độ rỗng thấm nước, hệ số hút nước mao quản và độ thấm ion clo ở cả tuổi bảo dưỡng ngắn ngày và dài ngày (tới 365 ngày). Các kết quả được phân tích và so sánh với BCĐC chỉ sử dụng xi măng pooc lăng. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu hình ảnh chụp ảnh vi cấu trúc bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) cũng được thực hiện để quan sát cấu trúc các vùng trong mẫu bê tông.

## 2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Vật liệu sử dụng

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng poóc lăng thường PC50 Cẩm Phả (XM). Kết quả tính chất kỹ thuật của xi măng đạt mức PC50 theo TCVN 2682: 2020 [22] (Bảng 1).

Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng và tro bay

STT	Chỉ tiêu	Phương pháp thí nghiệm	Đơn vị	XM	PC	CFB
1	Khối lượng riêng	TCVN 4030:2003 [23]	g/cm <sup>3</sup>	3,06	2,37	2,5
2	Độ mịn lọt sàng (90 μm)	TCVN 4030:2003 [23]	%	0,8	4,6	5,8
3	Lượng nước tiêu chuẩn	TCVN 6017:2015 [22]	%	29,5	21,0	50,5
4	Thời gian đông kết - Bắt đầu - Kết thúc	TCVN 6017:2015 [22]	Phút	85	-	-
			Phút	165	-	-
5	Cường độ nén/Hoạt tính cường độ* - 7 ngày - 28 ngày	TCVN 6016:2011 [24]	MPa/%	41,3	62,8	72,5
			MPa/%	57,6	86,9	88,3

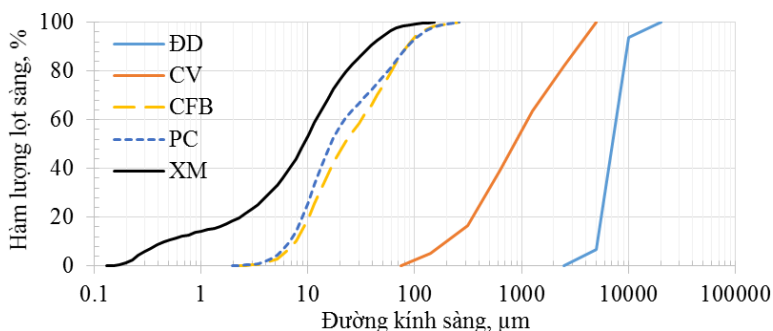
Ghi chú: \*Giá trị cường độ nén (MPa) đối với mẫu xi măng và giá trị hoạt tính cường độ (%) đối với mẫu tro bay PC và CFB.

Cốt liệu nhỏ được sử dụng là cát tự nhiên hạt thô (CV) và cốt liệu lớn được sử dụng là đá dăm  $D_{max} = 10$  mm (ĐD). Đá dăm  $D_{max} = 10$  mm được sử dụng nhằm tăng sự ổn định cấu trúc và cường độ hỗn hợp cốt liệu lớn. Tính chất cơ lý và thành phần hạt của cốt liệu được xác định theo TCVN 7572:2006 [25], kết quả thu được trình bày tại Bảng 2 và Hình 1. Có thể thấy rằng CV và ĐD sử dụng đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [26].

Bảng 2. Tính chất cơ lý của cát tự nhiên và đá dăm  $D_{max} = 10$  mm

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	CV	ĐD
1	Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,66	2,75
2	Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	g/cm <sup>3</sup>	2,58	2,70

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	CV	ĐD
3	Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa	g/cm <sup>3</sup>	2,61	2,72
4	Độ hút nước	%	1,1	0,6
5	Khối lượng thể tích đồ đông	g/cm <sup>3</sup>	1,55	1,48
6	Hàm lượng bụi bùn sét	%	1,8	2,36
7	Hàm lượng hạt > 5 mm	%	1,67	-
8	Mô đun độ lớn	-	3,04	-
9	Độ nén đập	%	-	3,9
10	Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	-	4,6



Hình 1. Thành phần hạt của các loại vật liệu sử dụng

Tro bay sử dụng được lấy trực tiếp từ xi lô chứa của hệ thống lọc bụi của nhà máy Nhiệt điện Quảng Ninh và Nhà máy Nhiệt điện Cẩm Phả (tỉnh Quảng Ninh). Tro bay của nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh sử dụng công nghệ đốt than phun (PC), còn nhà máy nhiệt điện Cẩm Phả sử dụng công nghệ đốt than tầng sôi tuần hoàn (CFB). Kết quả phân tích thành phần hóa của hai mẫu tro bay được trình bày tại Bảng 3. Hàm lượng sót trên sàng 45 μm tương ứng của tro bay PC và CFB là 21,4% và 20,9%.

Bảng 3. Thành phần hóa học của các loại tro bay sử dụng

Loại tro bay	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	BaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Khác	MKN
Tro bay PC	24,8	51,8	5,9	2,1	3,3	9,6	1,7	0,2	0,5	0,1	6,58
Tro bay CFB	24,8	49,3	6,3	6,4	1,8	9,6	0,7	0,2	0,2	0,7	6,81

Qua Bảng 3 cho thấy cả hai loại tro bay PC và CFB đều có hàm lượng CaO nhỏ hơn 10% nên các mẫu tro bay sử dụng đều thuộc loại tro bay axit (loại F) theo TCVN 10302:2014 [27]. Tổng hàm lượng ôxít (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) của tro bay PC và CFB tương ứng là 86,2% và 83,8%; hàm lượng mất khi nung (MKN) là 6,58% và 6,81% đều lớn hơn 6% nên không dùng được làm phụ gia cho xi măng theo ASTM C618 [28] và TCVN 10302:2014 [27]. Tuy nhiên, do cả hai loại than sử dụng đều có nguồn gốc từ than áng tra xít nên cả hai loại tro bay đều có thể làm phụ gia khoáng dùng cho chế tạo sản phẩm và cấu kiện bê tông, bê tông cốt thép làm việc trong điều kiện đặc biệt [27].

Phụ gia hóa học được sử dụng là phụ gia giảm nước cao và rắn nhanh có gốc Poly cacboxylat biến tính, có khối lượng riêng 1,12 kg/lít và độ pH bằng 6,5. Nước trộn và bảo dưỡng bê tông sử dụng là nước máy sinh hoạt.

## 2.2. Cấp phối hỗn hợp bê tông

Nghiên cứu được thực hiện trên cơ sở cấp phối bê tông cường độ cao  $\geq 60$  MPa (BCĐC) được thiết kế theo TCVN 10306:2014 [29]. Các loại cấp phối hỗn hợp bê tông bao gồm: bê tông đối chứng sử dụng 100% xi măng (ĐC); bê tông có sử dụng 40, 50, 60 và 70% xi măng được thay thế bằng tro bay PC (kí hiệu là 40PC, 50PC, 60PC và 70PC) hoặc tro bay CFB (kí hiệu là 40CFB, 50CFB, 60CFB và 70CFB). Thành phần các vật liệu cho 1 m<sup>3</sup> bê tông được trình bày trên Bảng 4. Do khối lượng riêng của tro bay PC và CFB nhỏ hơn so với xi măng nên để đảm bảo tổng thể tích 1 m<sup>3</sup> bê tông thì khối lượng cốt liệu được điều chỉnh giảm, nhưng vẫn đảm bảo tỷ lệ Cát/Đá không đổi. Các cấp phối hỗn hợp bê tông sử dụng CFB có lượng nước trộn và lượng phụ gia hóa dẻo lớn hơn so với hỗn hợp bê tông ĐC nhằm đảm bảo độ sụt của các hỗn hợp bê tông tương đương nhau và đạt  $20 \pm 2$  cm.

Bảng 4. Thành phần vật liệu và độ sụt của hỗn hợp bê tông

STT	Kí hiệu cấp phối	Tỷ lệ tro bay, %	CKD, kg		Cát, kg	Đá, kg	Nước, lít	PG, lít	Độ sụt, cm
			XM	TB					
1	ĐC	0	560	0	845	913	141	4.2	18,5
2	40PC	40	336	224	817	883	141	4.2	22,0
3	50PC	50	280	280	810	876	141	4.2	22,5
4	60PC	60	224	336	804	868	141	4.2	22,0
5	70PC	70	168	392	797	861	141	4.2	20,0
6	40CFB	40	336	224	824	890	171	6.2	22,0
7	50CFB	50	280	280	818	884	171	6.2	21,0
8	60CFB	60	224	336	813	879	171	6.2	19,0
9	70CFB	70	168	392	808	873	171	6.2	18,0

## 2.3. Phương pháp nghiên cứu

### a. Phương pháp bảo dưỡng mẫu và xác định cường độ nén

Hỗn hợp bê tông được lấy mẫu, đúc mẫu và bảo dưỡng dựa theo TCVN 3105:1993 [30]. Độ sụt hỗn hợp bê tông được xác định bằng TCVN 3106:1993 [31]. Các mẫu xác định cường độ nén, độ rỗng thấm nước, độ hút nước mao quản là mẫu lập phương có kích thước là  $10 \times 10 \times 10$  cm; mẫu xác định độ thấm ion clo là mẫu trụ  $d \times h = 10 \times 20$  cm. Các mẫu được đúc và bảo dưỡng 1 ngày trong khuôn thép ở điều kiện không khí của phòng thí nghiệm, sau đó mẫu được tháo khuôn và bảo dưỡng đến các thời điểm thí nghiệm ở 1, 3, 7, 28, 90, 180 và 365 ngày. Trong 27 ngày đầu mẫu được bảo dưỡng bằng cách ngâm trong nước, sau đó các mẫu được vớt ra và tiếp tục bảo dưỡng trong không khí đến khi thí nghiệm. Cường độ nén mẫu bê tông được xác định theo TCVN 3118 [32].

### b. Phương pháp xác định độ rỗng thấm nước

Độ rỗng thấm nước của mẫu bê tông được xác định dựa theo tiêu chuẩn ASTM C642:21 [33]. Trình tự thí nghiệm và tính toán cụ thể như sau:

- Sấy khô mẫu bằng tủ sấy ở nhiệt độ  $105 \pm 5$  °C trong 24 giờ, sau đó để nguội và xác định khối lượng mẫu khô được A (g).

- Cho mẫu vào bình ngâm mẫu ngập nước và đun sôi trong 5 giờ, sau đó để nguội đến nhiệt độ phòng rồi vớt ra lau ẩm bề mặt. Xác định khối lượng mẫu trong không khí được B (g) và trong nước được C (g).

- Độ rỗng thấm nước,  $r_n$  (%) được tính theo công thức (1):

$$r_n = \frac{B - A}{B - C} \cdot 100\% \quad (1)$$

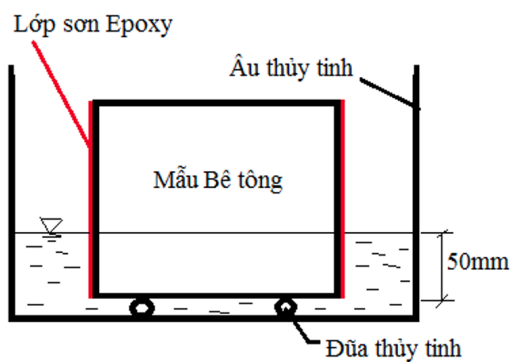
c. Phương pháp xác định độ hút nước mao quản

Trình tự tiến hành thí nghiệm xác định độ hút nước mao quản của bê tông theo tiêu chuẩn ASTM C 1585-20 [34] như sau:

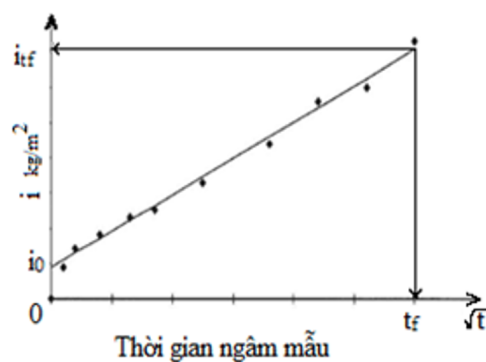
Mẫu thử đến tuổi thí nghiệm được sấy ở nhiệt độ  $105 \pm 5$  °C trong 24 giờ. Sau khi sấy, bỏ mẫu ra ngoài và để nguội trong bình chống ẩm đến nhiệt độ phòng thí nghiệm, chọn mặt tiếp xúc với nước là 1 mặt tiếp xúc với thành khuôn và đo kích thước để xác định tiết diện mặt mẫu,  $F$  (mm<sup>2</sup>). Dùng sơn chống thấm epoxy sơn phủ xung quanh mẫu thử, trừ 2 mặt mẫu là tiết diện sẽ tiếp xúc với nước và mặt đối diện. Cần sơn kỹ để đảm bảo nước không thấm từ các mặt xung quanh. Sau khi sơn chống thấm khô, dùng bút đánh dấu khoảng cách 50mm từ mặt tiếp xúc với nước trở lên. Cân khối lượng mẫu sau khi sơn được giá trị  $m_{0ss}$  (g), chính xác tới 0,05 g.

Đặt mẫu thử trên hai đĩa thủy tinh trong âu thủy tinh (âu có chiều cao  $\geq 100$  mm), sau đó đổ nước vào khay đến vạch đã đánh dấu và ghi lại thời điểm bắt đầu cho nước vào (Hình 2). Sau các khoảng thời gian: 1, 5, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 1380 và 1440 phút (24 giờ) kể từ thời điểm đổ nước, tiến hành vớt mẫu ra ngoài, dùng khăn ẩm lau hết phần nước nhỏ giọt trên mặt mẫu và cân ngay,  $m_t$  (g). Sau đó lại đặt mẫu vào trong khay để tiếp tục thí nghiệm. Độ hút nước mao quản tại các thời điểm thí nghiệm được tính theo công thức (2):

$$i_t = \frac{m_t - m_{0ss}}{F} \quad (2)$$



(a) Sơ đồ thí nghiệm



(b) Biểu đồ quan hệ  $i_t$  và  $s^{0.5}$

Hình 2. Thí nghiệm xác định hệ số hút nước mao quản của bê tông

Vẽ biểu đồ quan hệ giữa độ hút nước mao quản ( $i_t$ ) và căn bậc hai của thời gian ngâm nước ( $s^{0.5}$ ) (Hình 2). Sau đó vẽ đường thẳng gần đúng nhất qua các giá trị thí nghiệm để xác định hệ số hút nước mao quản ( $H_w$ ) như công thức (3):

$$H_w = \frac{i_{tf} - i_0}{\sqrt{t_f}} \quad (3)$$

trong đó  $i_{tf}$  là giá trị của  $i$  trên đường thẳng gần đúng tại thời điểm  $t_f$ , đơn vị kg/m<sup>2</sup>;  $i_0$  là giá trị của  $i$  trên đường thẳng gần đúng tại thời điểm  $t = 0$  s, đơn vị kg/m<sup>2</sup>;  $t_f$  là thời gian ngâm mẫu sau 24 giờ,  $t_f = \sqrt{86400}$  (giây<sup>0.5</sup>).

d. Phương pháp xác định độ thấm ion clo

Độ thấm ion clo của bê tông được xác định theo TCVN 9337:2012 [35]. Phương pháp này xác định nhanh độ thấm ion clo qua bê tông bằng phương pháp đo điện lượng truyền qua mẫu thử. Phương pháp đo điện lượng truyền qua được tiến hành dựa trên nguyên tắc áp dòng điện một chiều có điện thế 60 V vào hai mặt của mẫu thử, một mặt được tiếp xúc với NaCl 3% nối với cực âm, mặt kia tiếp xúc với dung dịch NaOH 0,3 N nối với cực dương. Khả năng thấm ion clo qua bê tông được xác định thông qua giá trị tổng điện lượng truyền qua mẫu thử trong thời gian 6h và được chia thành các mức: cao, trung bình, thấp, rất thấp, không thấm [35].

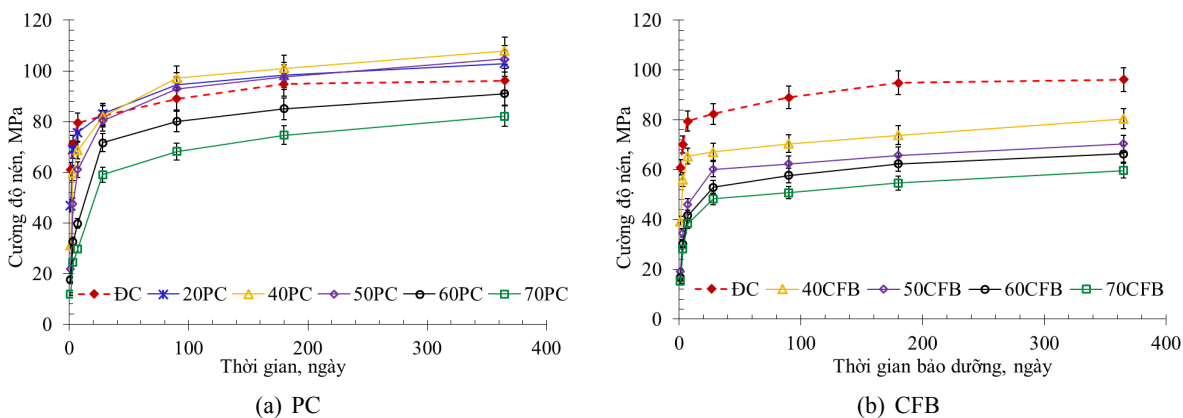
e. Phương pháp phân tích vi cấu trúc

Phân tích vi cấu trúc các vùng mẫu quan sát được thực hiện bằng phương pháp phân tích hình ảnh chụp bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM).

### 3. Kết quả và bàn luận

#### 3.1. Cường độ nén và sự phát triển cường độ nén

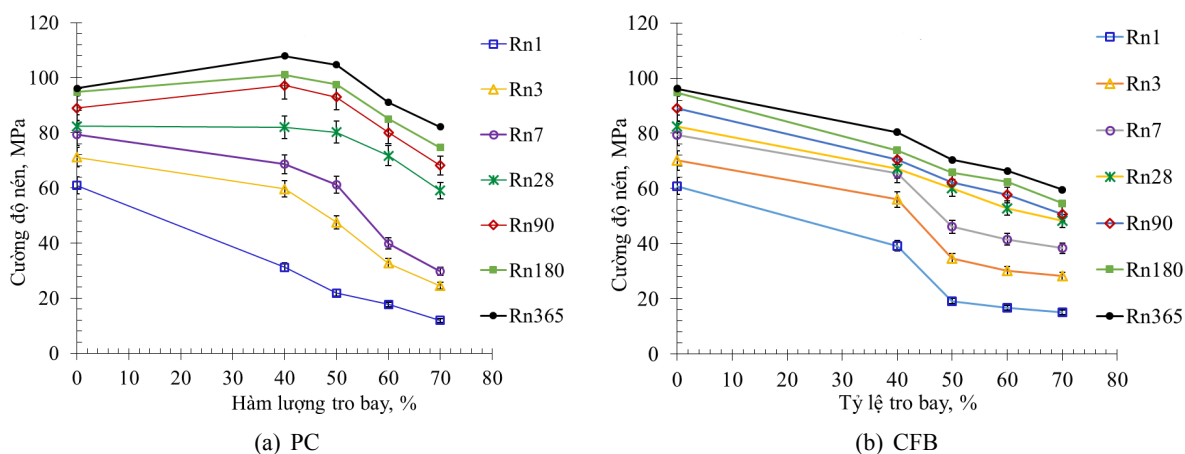
Sự ảnh hưởng của loại và hàm lượng tro bay đến cường độ nén trung bình của ba mẫu bê tông tại các tuổi bảo dưỡng khác nhau được trình bày trong Hình 3 và Hình 4.



Hình 3. Ảnh hưởng của loại tro bay PC và CFB đến sự phát triển cường độ nén của bê tông cường độ cao

Có thể thấy rằng, các mẫu ĐC không có tro bay cho cường độ nén sớm khá cao đạt 60,9 MPa; 71,1 MPa và 79,5 MPa ở 1, 3 và 7 ngày rắn chắc. Sự phát triển cường độ nén của bê tông tăng mạnh đến 28 ngày và đạt 82,4 MPa. Như vậy khi tính quy đổi về cường độ mẫu trụ, mẫu ĐC đạt yêu cầu của BCĐC [29]. Tuy nhiên, sau 28 ngày rắn chắc, tốc độ tăng cường độ nén trở nên ổn định và đến 365 ngày bảo dưỡng đạt 96,1 MPa. Việc sử dụng tro bay thay thế xi măng đã làm giảm cường độ nén của bê tông ở tuổi sớm và khi hàm lượng tro bay tăng thì mức độ suy giảm cường độ càng tăng, nhưng cường độ cải thiện đáng kể ở tuổi muộn (Hình 3). Sau 7 ngày bảo dưỡng cường độ nén của bê tông có 40, 50, 60 và 70% tro bay PC hoặc CFB lần lượt đạt 68,7; 61,1; 39,8 và 29,8 MPa (giảm 4,8-62,5% so với mẫu ĐC) hoặc 65,4; 46,1; 41,6 và 38,4 MPa (giảm 14,7-51,7%). Tro bay thay thế xi măng trong bê tông làm giảm số lượng các sản phẩm thủy hóa do đó dẫn đến cường độ nén ở tuổi sớm thấp. Các kết quả này phù hợp với những nghiên cứu trước đây [8, 36, 37]. Nhưng sự phát triển cường độ ở tuổi

muộn (sau 90 ngày) của BCĐC có tro bay tăng nhanh hơn so với mẫu ĐC nên mức độ giảm cường độ lớn nhất chỉ còn 14,5% đối với bê tông sử dụng 70% tro bay PC và 38,0% đối với tro bay CFB ở tuổi 365 ngày bảo dưỡng. Các mẫu bê tông sử dụng 40-50% tro bay có cường độ nén cải thiện đáng kể từ 28 ngày đến 365 ngày. Các mẫu có 60-70% tro bay thể hiện cường độ tăng nhanh từ 90 đến 365 ngày rắn chắc. Riêng đối với bê tông sử dụng 40 và 50% tro bay PC (40PC, 50PC), cường độ nén đã có thể vượt 4,4-9,1% cường độ nén của mẫu bê tông ĐC sau 90 ngày bảo dưỡng và vượt tới 8,9-12,3% sau 365 ngày bảo dưỡng. Điều này là do các hạt tro bay có kích thước nhỏ đã lấp đầy lỗ rỗng làm tăng độ đặc vi cấu trúc của bê tông; cùng với tỷ diện tích bề mặt và hàm lượng silica vô định hình cao đã thúc đẩy phản ứng pozzolanic tạo các sản phẩm bền vững và do đó cải thiện cường độ bê tông tuổi dài ngày hơn [5, 20].



Hình 4. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay PC và CFB đến cường độ nén của bê tông cường độ cao

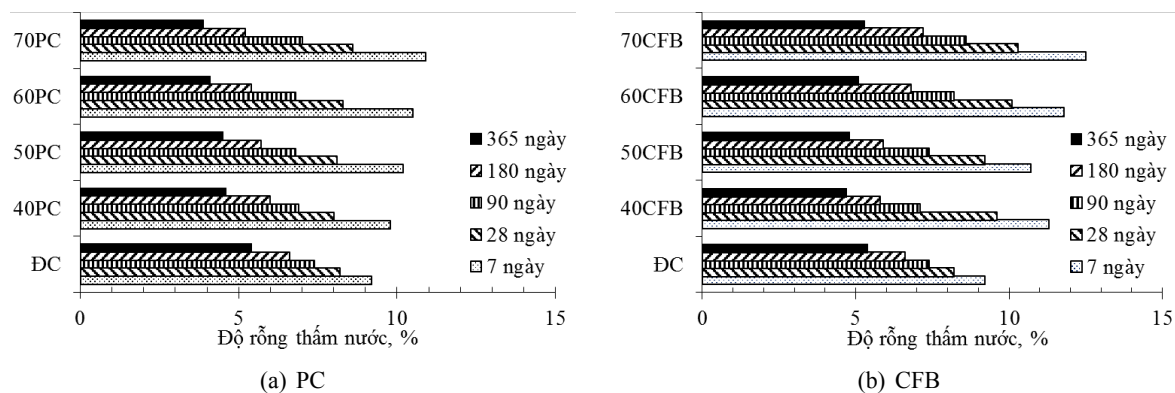
Khi so sánh ảnh hưởng của hai loại tro bay đến cường độ nén của bê tông cho thấy mức độ làm suy giảm cường độ của bê tông sử dụng CFB lớn hơn nhiều so với bê tông sử dụng PC (Hình 4). Sau một năm bảo dưỡng, các mẫu bê tông sử dụng CFB chỉ đạt 80,4; 70,4; 66,4 và 59,6 MPa (giảm 16,3-38,0% so với mẫu ĐC và thấp hơn 34,2- 48,7% với mẫu bê tông sử dụng lần lượt 40, 50, 60 và 70% PC). Nhưng chỉ riêng cường độ mẫu 70CFB ở tuổi rất sớm tại 1 và 3 ngày đạt 15,1 và 28,3 MPa lớn hơn so với mẫu bê tông 70PC (11,9 và 24,5 MPa). Điều này có thể là do bề mặt hạt tro bay CFB có đặc tính nhám ráp, góc cạnh lớn nên liên kết tiếp xúc với đá xi măng tốt; hạt tro bay có cấu trúc rỗng xốp nên hút nhiều nước của đá xi măng đã thúc đẩy phát triển cường độ sớm của lớp chất kết dính mặc dù tỷ lệ N/CKD của hỗn hợp bê tông sử dụng tro bay CFB cao hơn trong hỗn hợp bê tông sử dụng tro bay PC và mẫu ĐC.

### 3.2. Độ rỗng thấm nước

Để đánh giá thể tích lỗ rỗng hở của bê tông, nghiên cứu này đã xác định hàm lượng lỗ rỗng thấm nước ( $r_n$ ). Thí nghiệm này đánh giá được thể tích các lỗ rỗng mao quản, lỗ rỗng gel, lỗ rỗng không khí và các vết nứt siêu nhỏ trong bê tông [37]. Quan hệ giữa hàm lượng tro bay và độ rỗng thấm nước được thể hiện trong Hình 5. Có thể thấy rằng sau 28 ngày rắn chắc, độ rỗng thấm nước của các mẫu BCĐC là 8,2%, còn của BCĐC sử dụng 40-70% tro bay PC và CFB lần lượt đạt 8,0-8,6% và 9,2-10,3%. Độ rỗng thấm nước của bê tông có tro bay CFB cao hơn chủ yếu là do tỷ lệ N/CKD = 0,31 cao hơn nhiều so với N/CKD = 0,25 của bê tông ĐC. Mặt khác, khi hàm lượng tro bay thay thế xi măng tăng, độ



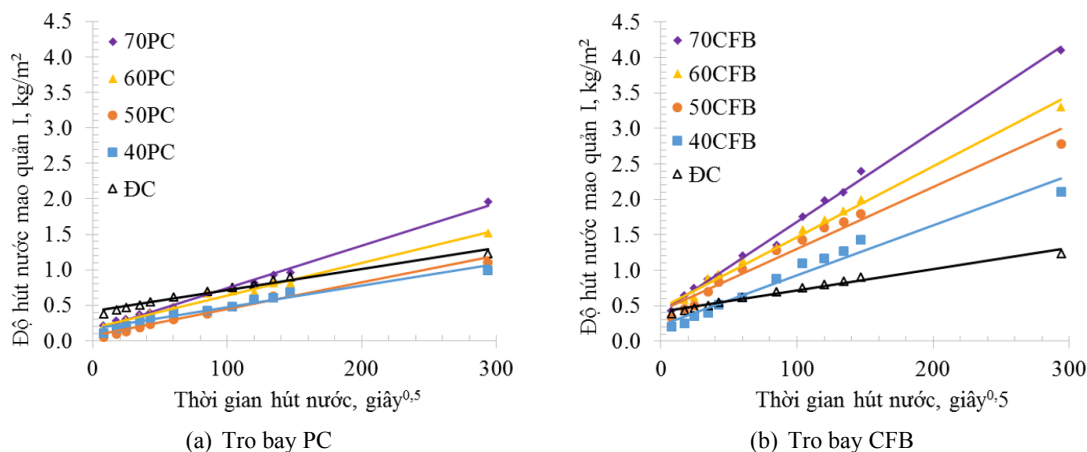
rỗng thấm nước tăng dần đối với bê tông ở tuổi trước 90 ngày bảo dưỡng, nhưng giảm dần đối với bê tông sử dụng tro bay PC ở các tuổi bảo dưỡng sau 90 ngày. Sau 90 ngày bảo dưỡng, độ rỗng thấm nước của bê tông sử dụng tro bay PC giảm còn 6,8-7,0%. Mức độ giảm còn lớn hơn chỉ còn 3,9-4,6% đối với bê tông sử dụng PC khi ở tuổi 365 ngày. Trong khi đó độ rỗng thấm nước của bê tông sử dụng CFB ở tuổi 365 ngày vẫn đạt 4,7-5,3%. Hiệu quả giảm độ rỗng thấm nước trong bê tông có tro bay nhờ vào hai hiệu ứng chính là: (1) Các hạt tro bay có thể xâm nhập lấp đầy hoặc làm giảm kích thước lỗ rỗng vi cấu trúc; (2) Do sự hydrat hóa của xi măng và phản ứng puzolan trong chất kết dính sẽ làm giảm hệ thống các lỗ rỗng mao quản và lỗ rỗng gel trong bê tông. Như vậy việc sử dụng tro bay có thể làm tăng khả năng chống thấm và khả năng chịu lực của bê tông, đặc biệt ở tuổi dài ngày.



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay PC và CFB đến độ rỗng thấm nước của bê tông cường độ cao

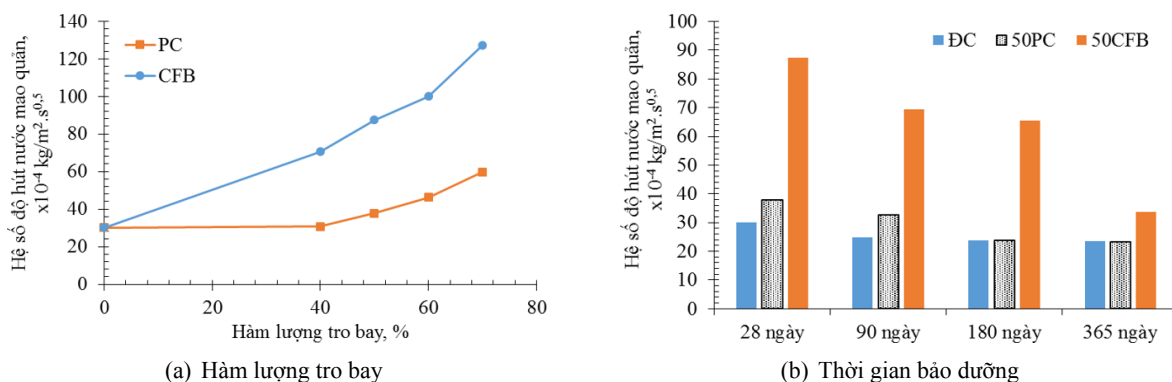
### 3.3. Độ hút nước mao quản

Ảnh hưởng của loại và hàm lượng tro bay đến độ hút nước mao quản của bê tông được trình bày trên Hình 6 và Hình 7. Có thể thấy rằng độ hút nước mao quản của tất cả các loại bê tông đều phụ thuộc tuyến tính vào căn bậc hai của thời gian ngâm mẫu trong nước (Hình 6). Độ hút nước mao quản của bê tông sử dụng tro bay PC là tương đương độ hút nước mao quản của bê tông ĐC, nhưng bê tông



Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay PC và tro bay CFB đến độ hút nước mao quản của BCĐC ở tuổi 28 ngày

sử dụng tro bay CFB lại có độ hút nước mao quản cao hơn nhiều. Cụ thể độ hút nước mao quản sau 24h ngâm nước của mẫu ĐC ở tuổi 28 ngày là  $1,23 \text{ kg/m}^2$ , còn của các mẫu bê tông sử dụng 40, 50, 60 và 70% tro bay PC lần lượt là 0,99; 1,10; 1,52 và  $1,96 \text{ kg/m}^2$ , còn đối với các mẫu bê tông có tro bay CFB các giá trị này tương ứng là 2,10; 2,78; 3,30 và  $4,10 \text{ kg/m}^2$ . Độ hút nước mao quản của bê tông sử dụng tro bay CFB cao hơn nhiều so với độ hút nước mao quản của bê tông sử dụng tro bay PC và bê tông ĐC là do có tỷ lệ  $N/CKD = 0,31$  cao hơn nhiều so với tỷ lệ này trong bê tông sử dụng PC và bê tông ĐC ( $N/CKD = 0,25$ ) nên lượng nước dư nhiều khi bay hơi trong quá trình rắn chắc của bê tông sẽ tạo ra hệ thống lỗ rỗng mao quản nhiều hơn. Sau một năm bảo dưỡng độ hút nước mao quản của bê tông ĐC, 50PC và 50CFB giảm rõ rệt chỉ còn lần lượt là 0,78; 0,68 và  $1,11 \text{ kg/m}^2$ . Điều này là do số lượng các sản phẩm thủy hóa trong xi măng và hỗn hợp chất kết dính tăng nên làm giảm mạnh hàm lượng lỗ rỗng mao quản trong BCĐC.



Hình 7. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và thời gian bảo dưỡng đến hệ số hút nước mao quản của BCĐC

Qua quan sát trên tất cả các mặt mẫu đều không có xuất hiện nước mao dẫn trên bề mặt, nên theo tiêu chuẩn ASTM C1585:21 [34] chúng ta xác định được các hệ số góc của các đường thẳng gần đúng trên Hình 6 chính là hệ số hút nước mao quản của các loại BCĐC. Hệ số này sẽ thể hiện tốc độ độ hút nước mao quản của các loại bê tông theo thời gian tiếp xúc với nước. Rõ ràng hệ số độ hút nước mao quản của bê tông ở tuổi 28 ngày có xu hướng tăng dần khi tăng hàm lượng tro bay (Hình 7(a)) và giảm theo thời gian bảo dưỡng (Hình 7(b)). Hệ số hút nước mao quản của mẫu ĐC ở 28 ngày là  $30 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ , còn của bê tông sử dụng 40-70% tro bay PC là  $(31-60) \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$  và bê tông sử dụng tro bay CFB là  $(71-127) \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ . Sau một năm bảo dưỡng, các giá trị này của mẫu bê tông ĐC, 50PC và 50CFB giảm mạnh lần lượt là 22,1%; 38,6% và 61,4% so với mẫu bê tông ở tuổi 28 ngày. Do thời gian bảo dưỡng lâu hơn cho phép xi măng và hỗn hợp chất kết dính tiếp tục thủy hóa và thực hiện phản ứng puzolan làm giảm các lỗ rỗng mao quản trong bê tông. Hơn nữa, tro bay cũng đóng vai trò như một loại chất kết dính làm giảm các lỗ rỗng liên kết và giảm độ dày của vùng giao diện chuyển tiếp giữa chất kết dính và cốt liệu [38]. Do đó, BCĐC có tro bay sẽ có mức độ giảm độ rỗng mao quản cao hơn ở tuổi dài ngày.

### 3.4. Độ thấm ion clo

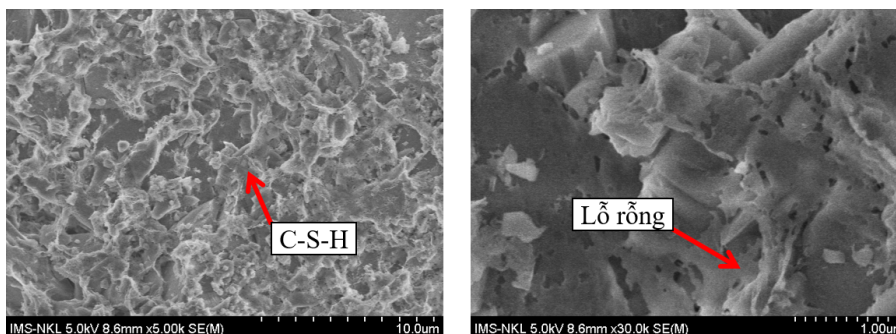
Tính thấm ion clo của BCĐC được xác định bằng phương pháp thử thấm nhanh [35]. Tổng điện lượng truyền qua các mẫu thử trong 6 giờ là một chỉ số cho thấy khả năng xâm nhập của ion clo qua bê tông. Tổng lượng điện tích đi qua các mẫu bê tông ở các thời gian bảo dưỡng khác nhau được thể hiện trên Hình 8. Có thể thấy rằng các mẫu BCĐC có tro bay cho khả năng thấm ion clo thấp hơn

nhiều so với mẫu BCĐC ko có tro bay ở cả tuổi 28 ngày đến 365 ngày. Sau 28 ngày rắn chắc, tổng điện lượng truyền qua mẫu ĐC là 1093 Culong, nên sự xâm nhập của ion clo ở mức độ thấp thấp theo TCVN 9337:2012 [35]. Còn đối với bê tông sử dụng tro bay PC và CFB, tổng điện lượng truyền qua lần lượt là 647 và 726 Culong (thấp hơn 40,8% và 33,6% so với mẫu ĐC), khả năng thẩm ion clo của cả hai loại bê tông này đều ở mức rất thấp. Điều đó chứng tỏ, tro bay có tác dụng làm tăng độ bền ăn mòn của bê tông trong môi trường xâm thực và BCĐC sử dụng tro bay PC có khả năng làm tăng khả năng chống thẩm ion clo của BCĐC cao hơn nhiều so với BCĐC sử dụng tro bay CFB [38]. Điều này là do trong quá trình thủy hóa, các lỗ rỗng mao quản có kích thước lớn trong bê tông đã được lấp đầy bằng các sản phẩm thủy hóa dẫn đến làm giảm kích thước lỗ rỗng và hạn chế các lỗ rỗng hở thông nhau [39, 40]. Mặt khác hạt tro bay PC thường có dạng hình cầu, bề mặt trơn nhẵn nên lượng cần nước thấp hơn nhiều so với tro bay CFB, cho nên tỷ lệ N/CKD trong bê tông thấp hơn và cấu trúc bê tông sử dụng tro bay PC cũng đặc chắc hơn bê tông sử dụng tro bay CFB [41].

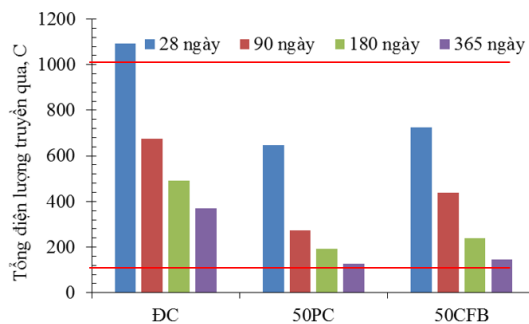
Hơn nữa khi BCĐC tiếp tục được bảo dưỡng ở tuổi dài ngày 90-365 ngày, mức độ giảm độ thẩm ion clo của các loại bê tông có tro bay cũng cao hơn nhiều so với bê tông ĐC. Tổng điện lượng truyền qua mẫu bê tông 50PC ở tuổi 90, 180 và 365 ngày lần lượt giảm 58,0-80,5% so với mẫu ở tuổi 28 ngày; mẫu bê tông 50CFB ở tuổi 90, 180 và 365 ngày giảm 39,7-79,8% so với mẫu ở tuổi 28 ngày.

Trong khi đó mẫu bê tông ĐC ở tuổi 90, 180 và 365 ngày có tổng điện lượng truyền qua chỉ giảm 38,1-66,2%. Trong khi tổng khối lượng CKD trong hỗn hợp bê tông là không đổi, sự xâm nhập của ion clo vào bê tông phụ thuộc vào hai yếu tố chính: (1) thể tích các lỗ rỗng liên kết của bê tông; và (2) nồng độ dung dịch các ion hydroxyl tự do trong lỗ rỗng. Việc sử dụng tro bay thay thế xi măng đã làm giảm thể tích các lỗ rỗng liên kết dẫn đến làm tăng độ chắc chắn vi cấu trúc của bê tông so với mẫu bê tông ĐC. Ngoài ra, việc bổ sung các hạt tro bay còn có thể liên kết với các ion hydroxyl, làm giảm độ kiềm của dung dịch trong hệ thống lỗ xốp và do đó ngăn cản sự di chuyển các điện lượng và xâm nhập của các ion clo [42]. Kết quả này cũng phù hợp với các tài liệu nghiên cứu trước đây [5, 7, 13, 18, 43].

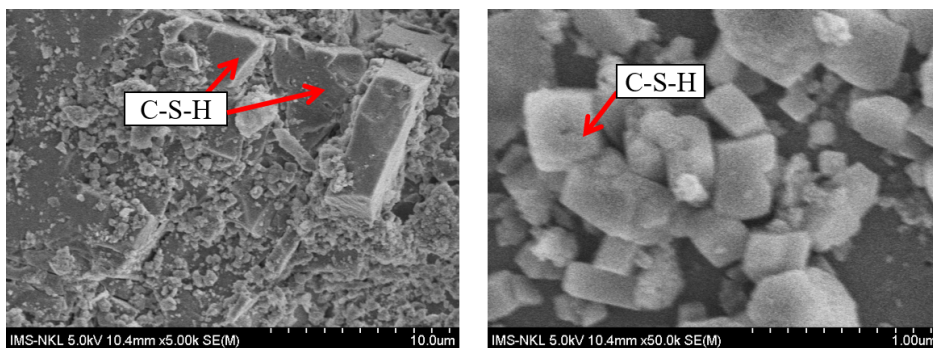
### 3.5. Vi cấu trúc của bê tông



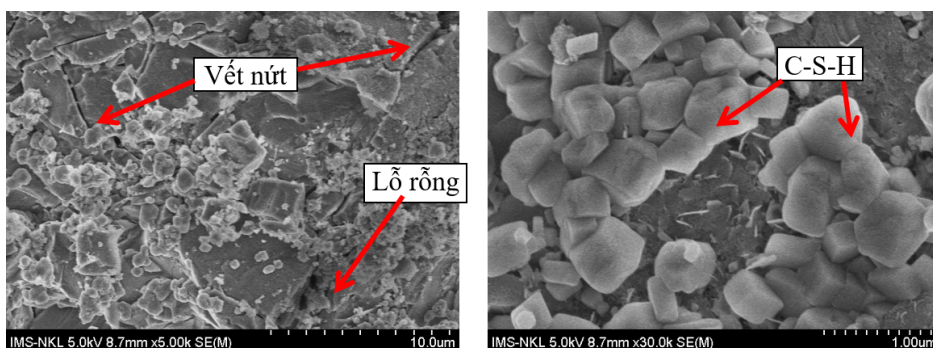
(a) Mẫu ĐC



Hình 8. Ảnh hưởng của loại tro bay đến độ thẩm ion clo của bê tông



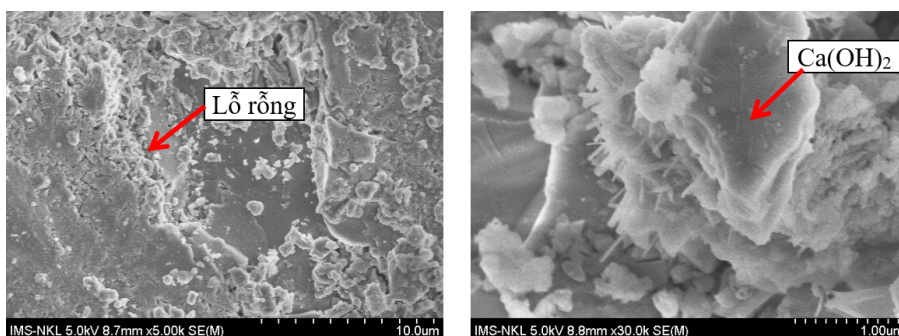
(b) Mẫu 50 PC



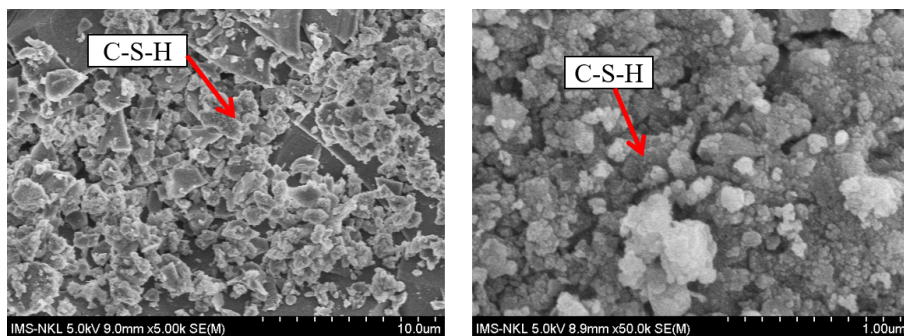
(c) Mẫu 50CFB

Hình 9. Mẫu ĐC, 50PC, 50CFB ở tuổi 28 ngày bảo dưỡng

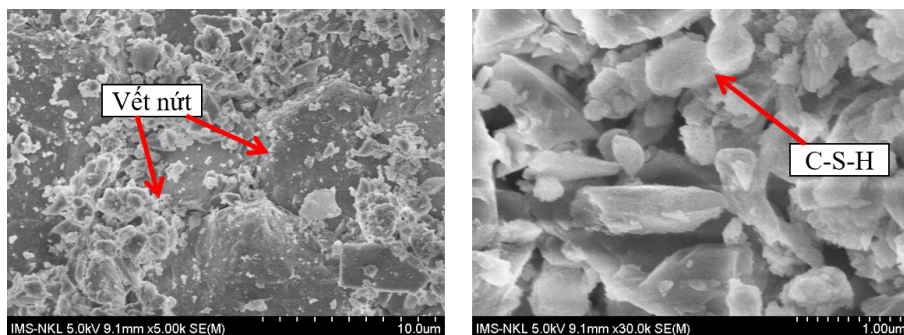
Hình ảnh chụp vi cấu trúc lớp CKD của các loại BCĐC ở tuổi 28 ngày và 365 ngày được thể hiện trên Hình 9 và Hình 10. Có thể thấy rằng các mẫu bê tông ĐC và 50PC có cấu trúc khá đặc chắc với nhiều sản phẩm thủy hóa dạng C-S-H và  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Còn mẫu 50CFB có xuất hiện nhiều vết nứt và nhiều lỗ rỗng hở thông nhau hơn so với mẫu ĐC và 50PC (Hình 9). Điều này là do tỷ lệ N/CKD của hỗn hợp bê tông ĐC và 50PC chỉ là 0,25 thấp hơn so với tỷ lệ  $\text{N/CKD} = 0,31$  trong hỗn hợp bê tông 50CFB. Tuy nhiên trong đá CKD của bê tông có tro bay (50PC, 50CFB) đã thấy xuất hiện những sản phẩm của phản ứng puzolan giữa  $\text{SiO}_2$  trong hạt tro bay và  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nên làm giảm số lượng các khoáng portlandit trong lớp sản phẩm thủy hóa của CKD.



(a) Mẫu ĐC



(b) Mẫu 50 PC



(c) Mẫu 50CFB

Hình 10. Mẫu ĐC, 50PC, 50CFB ở tuổi 365 ngày bảo dưỡng

Từ Hình 10 cho thấy số lượng sản phẩm thủy hóa C-S-H trong vi cấu trúc đá CKD đã nhiều và dày đặc hơn, đặc biệt trong hệ thống các lỗ rỗng, các khe rỗng khi bê tông được bảo dưỡng ở tuổi dài ngày. Trên hình ảnh phóng đại đến 1  $\mu\text{m}$  của mẫu ĐC vẫn tồn tại các khoáng portlandit và tinh thể entrigit hình kim. Còn trên ảnh chụp khe rỗng của lớp CKD trong bê tông có tro bay (50PC, 50CFB) thì các sản phẩm dày đặc hơn, các tinh.

#### 4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Việc sử dụng tro bay hàm lượng lớn trong bê tông cường độ cao sẽ làm chậm tốc độ phát triển cường độ nén ở tuổi sớm trước 28 ngày nhưng thúc đẩy sự phát triển cường độ nén ở tuổi dài ngày tới 365 ngày. Trong đó, bê tông sử dụng tro bay loại PC (của nhà máy nhiệt điện đốt than phun) có khả năng duy trì cường độ nén ở tuổi sớm và thúc đẩy sự phát triển cường độ nén ở tuổi muộn cao hơn so với bê tông tro bay loại CFB (của nhà máy nhiệt điện đốt than tầng sôi tuần hoàn). Mức độ suy giảm hoặc cải thiện cường độ nén trong bê tông phụ thuộc vào hàm lượng tro bay sử dụng và hiệu quả của phản ứng pozzolanic.

- Việc sử dụng tro bay thay thế xi măng đã làm tăng độ rỗng thấm nước, độ hút nước mao quản của bê tông cường độ cao ở giai đoạn đầu rắn chắc, nhưng các giá trị này đã giảm rõ rệt so với bê tông đối chứng sau sáu tháng rắn chắc. Mức độ tăng hay giảm độ rỗng thấm nước, độ hút nước mao quản tùy thuộc vào loại và hàm lượng tro bay sử dụng.

- Bê tông cường độ cao sử dụng tro bay có độ thấm ion clo thấp hơn bê tông cường độ cao không sử dụng tro bay khi được bảo dưỡng trong 28 và 365 ngày. Điều này là do các hạt tro bay có thể liên kết với các ion hydroxyl, làm giảm độ kiềm của dung dịch trong hệ thống lỗ xốp và do đó ngăn cản sự di chuyển các điện lượng và xâm nhập của các ion clo.

- Hình ảnh vi cấu trúc cho thấy rằng việc sử dụng tro bay thay thế xi măng đã cải thiện rõ rệt độ đặc của lớp chất kết dính, đặc biệt khi bê tông được bảo dưỡng ở tuổi dài ngày. Tuy nhiên cần tiếp tục nghiên cứu đánh giá định lượng hiệu quả giảm kích thước lỗ rỗng mao quản và độ thấm ion clo khi sử dụng tro bay PC và CFB với các hàm lượng thay thế xi măng khác nhau.

### Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Bộ xây dựng cho đề tài nghiên cứu và phát triển ứng dụng bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng tro bay lớn trong các kết cấu công trình ven biển và hải đảo”, mã số: RD 25-20.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Mehta, P. K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *ACI Concrete international*, 24(7):23–28.
- [2] Tong, K., Le, T., Pham, L. (2013). Sustainability in the concrete industry for construction of mega cities. *Proceeding of International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA2013), Hanoi Oct 9-11, 2013*.
- [3] Siddique, R., Khan, M. I. (2011). *Supplementary cementing materials*. Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Thomas, M. (2007). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. Portland Cement Association.
- [5] Malhotra, V. M., Zhang, M.-H., Read, P. H., Ryell, J. (2000). Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-strength/high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions. *ACI Materials Journal*, 97(5):518–525.
- [6] US EIA (2022). *Electric power annual report*. Truy cập 1/2023.
- [7] Kiên, T. T., và cs. (2022). Nghiên cứu và phát triển ứng dụng bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng tro bay lớn trong các kết cấu công trình ven biển và hải đảo. Báo cáo tổng kết đề tài KHCN cấp Bộ XD, mã số RD25-20.
- [8] Nam, V. H. (2016). Nghiên cứu sử dụng tro tuyển Phả Lại hàm lượng cao trong bê tông khối lớn thông thường dùng cho đập trọng lực. Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng.
- [9] ACI 232.2R-96 (1996). *Use of fly ash in concrete*. American Concrete Institute, Detroit.
- [10] Cho, Y. K., Jung, S. H., Choi, Y. C. (2019). Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*, 204:255–264.
- [11] Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3):327–363.
- [12] Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A. A., Abri, A., Sattler, M., Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11:e00263.
- [13] Naik, T. R., Singh, S. S., Ramme, B. W. (1998). Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with Blended Fly Ash. *ACI Materials Journal*, 95(4):454–462.
- [14] Supit, S. W. M., Shaikh, F. U. A. (2014). Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. *Materials and Structures*, 48(8):2431–2445.
- [15] Mardani-Aghabaglou, A., Özge Andiç-Çakir, Ramyar, K. (2013). Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement and Concrete Composites*, 37:259–266.
- [16] Gopalan, M. K. (1996). Sorptivity of fly ash concretes. *Cement and Concrete Research*, 26(8):1189–1197.
- [17] Haque, M. N., Kayali, O. (1998). Properties of high-strength concrete using a fine fly ash. *Cement and Concrete Research*, 28(10):1445–1452.
- [18] Wang, S., Llamazos, E., Baxter, L., Fonseca, F. (2008). Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests. *Fuel*, 87(3):359–364.
- [19] Chindapasirt, P., Chotithanorm, C., Cao, H. T., Sirivivatnanon, V. (2007). Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, 21(2):356–361.

- [20] Isaia, G. C., Gastaldini, A. L. G., Moraes, R. (2003). [Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 25(1):69–76.
- [21] Viet, C. T., Ken, K., Ton, K. T., Hoang, G. N. (2022). [Review on current situation of generation and management of coal ash in Vietnam](#). *International Journal of GEOMATE*, 22(91).
- [22] TCVN 6016:2011. *Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [23] TCVN 6017:2015 ISO 9597:2008. *Xi măng-Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [24] TCVN 4030:2003. *Phương pháp xác định độ mịn đối với xi măng*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [25] TCVN 7572:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [26] TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [27] TCVN 10302:2014. *Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [28] ASTM C618-19 (2019). [Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete](#). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] TCVN 10306:2014. *Bê tông cường độ cao - Thiết kế thành phần mẫu hình trụ*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [30] TCVN 3105:1993. *Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu bê tông*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [31] TCVN 3106:1993. *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [32] TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng- Phương pháp xác định cường độ nén*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [33] ASTM C642-06 (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials International.
- [34] ASTM C1585-13 (2013). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-cement Concretes*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials International.
- [35] TCVN 9337: 2012. *Bê tông nặng - Xác định độ thấm ion Clo bằng phương pháp đo điện lượng*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [36] Lâm, N. T., Kiên, T. T., Đại, B. D. (2021). [Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng lớn tro bay của nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(6V):1–11.
- [37] Shaikh, F. U., Supit, S. W. (2015). [Compressive strength and durability properties of high volume fly ash \(HVFA\) concretes containing ultrafine fly ash \(UFFA\)](#). *Construction and Building Materials*, 82: 192–205.
- [38] Kuroda, M., Watanabe, T., Terashi, N. (2000). [Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash](#). *Cement and Concrete Research*, 30(2):253–258.
- [39] Wang, L., Jin, M., Guo, F., Wang, Y., Tang, S. (2021). [Pore structural and fractal analysis of the influence of fly ash and silica fume on the mechanical property and abrasion resistance of concrete](#). *Fractals*, 29 (02):2140003.
- [40] Hassan, K. E., Cabrera, J. G., Maliehe, R. S. (2000). [The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 22(4):267–271.
- [41] Huyền, B. T. T., Kiên, T. T., Cường, L. M., Minh, N. T., Phát, N. M. (2021). [Nghiên cứu đánh giá khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng tro bay lớn tiếp xúc với nước biển](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(6V):94–110.
- [42] Shehata, M. H., Thomas, M. D. A., Bleszynski, R. F. (1999). [The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes](#). *Cement and Concrete Research*, 29(12):1915–1920.
- [43] Chalee, W., Ausapanit, P., Jaturapitakkul, C. (2010). [Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis](#). *Materials & Design*, 31(3):1242–1249.