

# Nghiên cứu sử dụng hạt vi cầu rỗng từ tro bay thay thế một phần cốt liệu nhỏ cho chế tạo bê tông nhẹ chịu lực

Lê Việt Hùng<sup>1</sup>, Lê Trung Thành<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Tuấn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Viện Vật liệu xây dựng, Số 235 Nguyễn Trãi, Q. Thanh Xuân, Hà Nội

<sup>2</sup> Trường Đại học xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Q. Hai Bà Trưng, Hà Nội

## TỪ KHOÁ

Hạt vi cầu rỗng từ tro bay  
Bê tông nhẹ  
Bê tông nhẹ chịu lực  
Cenospheres  
Bê tông nhẹ cường độ cao  
Cốt liệu nhẹ

## TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu sử dụng các hạt vi cầu rỗng từ tro bay, còn gọi là hạt cenosphere (FAC) thay thế một phần hoặc hoàn toàn cốt cốt liệu nhỏ trong bê tông để chế tạo loại bê tông nhẹ chịu lực với khối lượng thể tích (KLTT) trong khoảng từ 1300 đến 1800 kg/m<sup>3</sup>, cường độ nén trên 40 MPa. Cát được sử dụng thay thế một phần cenospheres ở các tỷ lệ cát/FAC là 0, 20, 40, 60, 80 và 100 % theo thể tích. Kết quả thí nghiệm cho thấy, khi thay thế cát bởi FAC, khối lượng thể tích của bê tông giảm tương ứng, từ 2180 kg/m<sup>3</sup> của mẫu 100 % cát xuống còn 1312 kg/m<sup>3</sup> khi thay thế hoàn toàn cốt liệu cát bằng FAC. Tuy nhiên, các tính chất cơ học cơ bản của bê tông sử dụng FAC như cường độ nén, cường độ uốn, mô đun đàn hồi bị giảm, độ hút nước tăng, mặc dù cường độ riêng (tỷ lệ cường độ nén so với KLTT) tăng đáng kể.

## KEYWORDS

Hollow microspheres from fly ash  
Lightweight concrete  
Structural lightweight concrete  
Cenospheres  
High-strength lightweight concrete  
Lightweight aggregate

## ABSTRACT

This paper presents the experimental results on use of hollow microspheres from fly ash, also known as cenospheres (FAC) to partially or fully replace fine aggregates in concrete to make structural lightweight concrete with density in the range of 1300 to 1800 kg/m<sup>3</sup>, compressive strength over 40 MPa. Sand was used to partially replace cenospheres at sand/FAC ratios of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 % by volume. Experimental results show that when replacing sand by FAC, the density of concrete decreases respectively, from 2180 kg/m<sup>3</sup> of the 100% sand mix to 1312 kg/m<sup>3</sup> of the mix fully replacing sand by FAC. However, the basic mechanical properties of concrete using FAC such as compressive strength, flexural strength, elastic modulus were reduced, and water absorption was increased, despite the specific strength (ratio of compressive strength and density) increased significantly.

## 1. Giới thiệu

Theo ACI 318-14 [1], bê tông nhẹ kết cấu là loại bê tông cốt liệu nhẹ có cường độ từ 17 MPa trở lên, tiêu chuẩn thiết kế bê tông cốt thép của Châu Âu (EN 1992 [2]) qui định bê tông nhẹ kết cấu là loại từ LC 8/9 trở lên, tức cường độ nén đặc trưng mẫu trụ tối thiểu là 8 MPa và 9 MPa với mẫu lập phương. Cho đến nay, các loại cốt liệu sử dụng cho chế tạo các loại bê tông nhẹ này thường là cốt liệu nhẹ nhân tạo được chế tạo từ đất sét, đá phiến sét, phiến sét được nung phồng nở. Ưu điểm của loại cốt liệu này là có thể chế tạo ra được hạt cốt liệu với kích thước theo mong muốn từ cốt liệu lớn đến cốt liệu nhỏ. Các hạt cốt liệu nhẹ nung nở có cấu trúc xốp lớn. Với mỗi loại cốt liệu nhẹ này, thường có một giới hạn cường độ nén tối đa có thể đạt được, phụ thuộc vào cỡ hạt lớn nhất của cốt liệu, ví dụ mức giới hạn khoảng 52 MPa với cốt liệu nhẹ Dmax 10 mm. Theo ACI 213-14 thì với các loại cốt liệu nhẹ phổ biến hiện nay, cường độ bê tông được chế tạo ổn định là khoảng 27,6 MPa [3]. Ngoài ra, do các loại cốt liệu nhẹ truyền thống có cấu trúc xốp, độ hút nước của

chúng phụ thuộc nhiều vào các cấu tạo của hệ thống lỗ rỗng, nhưng nói chung ở mức tương đối cao, thường từ 6 đến 30 % [4, 5]. Khi bê tông sử dụng các loại cốt liệu nhẹ, khả năng chống thấm bị giảm, đặc biệt khi sử dụng cả cốt liệu nhẹ loại lớn và cốt liệu nhỏ [6]. Ngoài ra, việc hình dạng góc cạnh, phân bố lỗ rỗng không đồng đều nên độ hút nước (ở trạng thái SSD) của cốt liệu nhẹ từ các loại vật liệu này dao động lớn. Chính vì vậy, loại bê tông cốt liệu nhẹ này tương đối nhạy cảm trong môi trường ẩm do sự hút ẩm làm thay đổi khối lượng thể tích, thể tích của bê tông, cũng như khả năng xâm nhập dễ dàng hơn của các yếu tố xâm thực vào bê tông làm ảnh hưởng đến độ bền lâu và khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông. Ngoài ra, để sản xuất được cốt liệu nhẹ nhân tạo phải trải qua nhiều công đoạn, điều này làm tăng giá thành và phát thải khí CO<sub>2</sub> trong quá trình sản xuất chúng.

Bên cạnh các loại bê tông cốt liệu nhẹ phổ biến, bê tông nhẹ sử dụng hạt vi cầu rỗng từ tro bay - cenosphere (FAC) được quan tâm và phát triển trong khoảng hơn thập niên trở lại đây. FAC là các hạt nhẹ có trong tro bay nhà máy nhiệt điện, khối lượng thể tích của chúng

\*Liên hệ tác giả: lvhung210@gmail.com

Nhận ngày 05/10/2021, sửa xong ngày 21/10/2021, chấp nhận đăng 04/11/2021

thường trong khoảng 0,4 đến 0,9 g/cm<sup>3</sup>, kích thước hạt trong khoảng 1-300 μm, với các hạt chủ yếu trong khoảng 20-300 μm, chúng là những hạt có kích thước lớn trong tro bay so với các hạt tro bay khác có kích thước hạt chủ yếu dưới 20 μm, chiều dày thành vách trong khoảng 1 đến 18 μm [7, 8]. Theo báo cáo của một số nghiên cứu, các hạt cenosphere có lớp vỏ có khả năng chống thấm khí và nước [9], khả năng kháng nén dập của hạt khoảng 15,6-17,5 MPa[10], cao hơn khá nhiều so với cốt liệu nhẹ phổ biến là keramzit trong khoảng 0,82-5,6 MPa [5]. Chính vì vậy, các nghiên cứu về sử dụng cenospheres làm vi cốt liệu nhẹ cho chế tạo bê tông nhẹ cường độ cao được thực hiện khá nhiều trong những năm gần đây. Bê tông nhẹ sử dụng cenospheres được ghi nhận có KLTT thấp và cường độ cao hơn so với các loại bê tông cốt liệu nhẹ truyền thống. Bê tông sử dụng FAC cơ bản đáp ứng được tiêu chuẩn yêu cầu về cường độ với bê tông nhẹ kết cấu với dải KLTT từ khoảng 1200 kg/m<sup>3</sup> trở lên. Do vậy, loại bê tông nhẹ này có thể phân loại là bê tông chịu lực với nhiều ưu điểm nổi trội so với loại bê tông cốt liệu nhẹ truyền thống. Loại bê tông này thường không sử dụng cốt liệu lớn, mà kích thước hạt lớn nhất thường là hạt cát hoặc hạt vi cầu. Bên cạnh các ưu điểm về cường độ, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra, tương tự như các loại bê tông cốt liệu nhẹ khác, bê tông sử dụng FAC có đặc tính dòn và mô đun đàn hồi thấp là những nhược điểm làm hạn chế ứng dụng chúng [8, 11, 12]. Vấn đề này xuất phát từ nguyên nhân, bê tông sử dụng FAC không có bộ khung cốt liệu đặc chắc như bê tông thông thường, các hạt FAC có kích thước nhỏ và độ rỗng lớn hơn so với cốt liệu thông thường.

Để cải thiện khả năng chịu uốn và mô đun đàn hồi của bê tông sử dụng FAC, nghiên cứu này sử dụng kết hợp cốt liệu đặc chắc là cát tự nhiên với FAC với vai trò là cốt liệu cho chế tạo loại bê tông nhẹ chịu lực (FAC SLWC). Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu một số tính chất của FAC SLWC và so sánh với bê tông thông thường với cốt liệu là cát tự nhiên.

**2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu**

**2.1. Vật liệu nghiên cứu**

Vật liệu cho chế tạo FAC SLWC gồm cát sông cỡ hạt 0,15 đến 0,63 mm; cenospheres (FAC) từ tro bay nhà máy nhiệt điện, chất kết dính gồm xi măng poóc lăng loại PC50 theo TCVN 2682 và silica fume (SF) của hãng Elkem, phụ gia siêu sêo gốc polycarboxylate PCE loại F theo ASTM C494 và nước máy. Tính chất vật liệu sử dụng được trình bày tương ứng trong Bảng 1 và thành phần hạt của vật liệu thể hiện trong Hình 1 và Hình 2.

**2.2. Phương pháp thí nghiệm**

Độ chảy của hỗn hợp bê tông được xác định theo TCVN 3121-2:2003. Giá trị độ chảy được lấy bằng trung bình đường kính của hai lần đo vuông góc. Cường độ nén và uốn FAC SLWC được xác định với mẫu kích thước 40x40x160 mm theo tiêu chuẩn TCVN 6016:2011. Mô

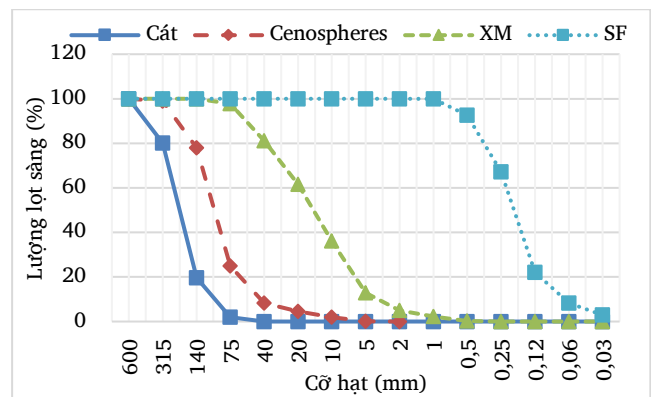
đun đàn hồi được xác định tương ứng biến dạng ở tải trọng 40 % cường độ bê tông trên mẫu trụ Φ150x300 mm theo ASTM C469. Khối lượng thể tích và độ hút nước được xác định với mẫu kích thước 40x40x160 mm ở trạng thái khô theo tiêu chuẩn BS EN 1015-10:1999. Mẫu bê tông được sấy khô đến khối lượng không đổi ở 105±5 °C và cân được khối lượng mẫu khô, sau đó ngâm bão hòa nước trong 48 h để cân khối lượng ẩm. Độ hút nước là phần trăm chênh lệch khối lượng mẫu ẩm và mẫu sấy khô của 3 mẫu thí nghiệm song song.

**Bảng 1.** Tính chất cơ lý của xi măng, silica fume, cenosphere, cát sử dụng.

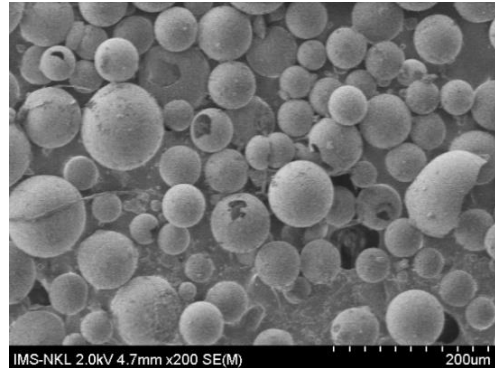
Tính chất cơ lý	Xi măng	Silica fume	Cenospheres	Cát 0,15-0,63
Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	3,1	2,16	0,786	2,62
Độ hút nước (%)	-	-	10,3	3,2
Thời gian bắt đông kết (phút)			-	-
Bắt đầu	120	-		
Kết thúc	170			
Diện tích bề mặt riêng, (cm <sup>2</sup> /g)	3820	29.900	-	-
Kích thước hạt trung bình (μm)	16,68	0,15	121	228
Cường độ nén 28 ngày (MPa)	53,5	-	-	-
Chỉ số hoạt tính (%)	-	115	-	-

**2.3. Cấp phối vật liệu và quy trình trộn FAC SLWC**

Chất kết dính sử dụng gồm xi măng OPC và SF với tỷ lệ 10% thay thế xi măng. Các cấp phối FAC SLWC được nghiên cứu với tỷ lệ cát/cenosphere thay đổi 0, 20, 40, 60, 80 và 100 % theo thể tích, tương ứng với thể tích FAC trong HHTB là 0, 20, 22, 25, 29, 34 và 42 % và cấp phối đối chứng sử dụng cốt liệu là 100 % cát. Các cấp phối được khống chế cùng tỷ lệ N/CKD=0,4 và hàm lượng CKD=750 kg/m<sup>3</sup>. Chi tiết tỷ lệ vật liệu sử dụng trong nghiên cứu thể hiện ở Bảng 2.



**Hình 1.** Thành phần hạt vật liệu.



Hình 2. Hình dạng hạt cenosphere sử dụng trong nghiên cứu.

Bảng 2. Tỷ lệ thành phần vật liệu thí nghiệm.

Cấp phối	Tỷ lệ cát/FAC (% theo thể tích)	Hàm lượng FAC (% theo thể tích)	Tỷ lệ N/CKD	Thành phần CKD (% theo khối lượng)	
				SF	XM
ĐC (100% cát)	-	0	0,4	10	90
RS0	0	42	0,4	10	90
RS20	20	34	0,4	10	90
RS40	40	29	0,4	10	90
RS60	60	25	0,4	10	90
RS80	80	22	0,4	10	90
RS100	100	20	0,4	10	90

#### 2.4. Quy trình trộn

Máy trộn sử dụng trong nghiên cứu là máy trộn hành tinh 20L. Quy trình cấp vật liệu trộn vào máy như sau: Xi măng và phụ gia khoáng được đưa vào máy trộn khô đều trong khoảng 2 phút, sau đó cho khoảng 70 % nước trộn đều trong khoảng 2 phút, làm sạch cối trộn và cho phụ gia siêu dẻo + 30 % nước còn lại trộn đều trong vòng 2-3 phút. Liều lượng PGSD được điều chỉnh để hỗn hợp bê tông đảm bảo tính công tác như mong muốn.

### 3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

#### 3.1. Tính công tác

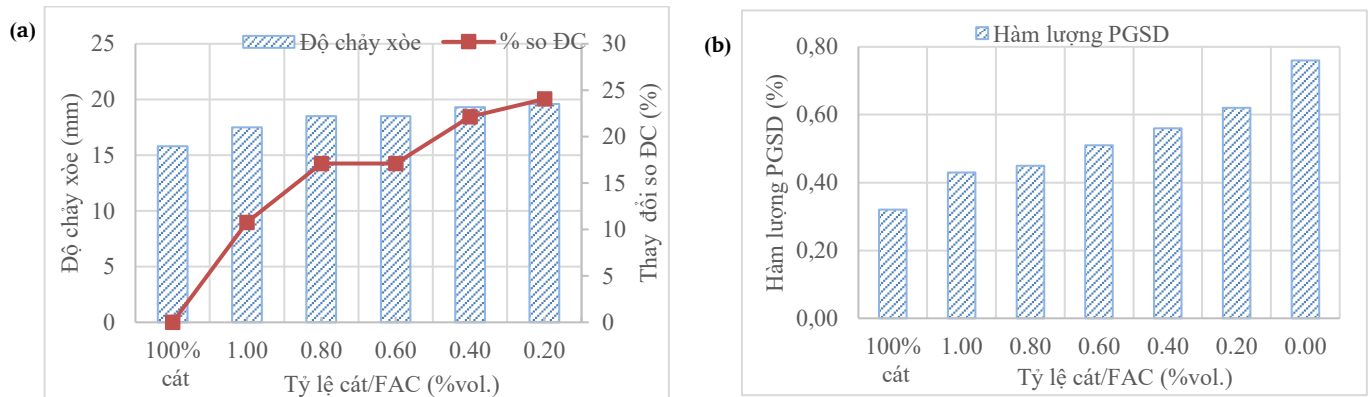
Độ chảy của hỗn hợp bê tông FAC SLWC với tỷ lệ N/CKD = 0,4 và hàm lượng phụ gia siêu dẻo cố định 0,6 % thể hiện trong Hình 3a cho thấy, khi hàm lượng FAC trong hỗn hợp bê tông tăng thì hỗn hợp bê tông có xu hướng giảm tính công tác khi đánh giá thông qua độ chảy xê. Cụ thể độ chảy xê của hỗn hợp bê tông giảm của mẫu đối chứng là 215 mm giảm xuống còn 180 mm và 158 mm, tương ứng giảm khoảng 8,8 đến 26,5 % so với mẫu đối chứng khi thể tích FAC tăng trong khoảng từ 20 đến 42 % so với mẫu đối chứng. Hiện tượng giảm tính linh động của hỗn hợp bê tông có thể giải thích là do tổng tỷ diện của các hạt FAC lớn hơn so với cát nên khi thay thế cát bởi FAC thì tổng diện tích bề mặt trong hệ tăng lên (điều này cũng có thể thấy độ hút nước để đạt trạng thái bão hòa khô bề mặt của FAC lớn hơn cát)

do đó làm giảm lượng nước tự do trong hệ dẫn đến tính linh động của hỗn hợp bê tông giảm. Ngoài ra, do đặc tính của các hạt FAC nên độ hút nước của FAC để đạt độ ẩm bão hòa cao hơn nhiều so với cát như thể hiện trong Bảng 1 cũng là nguyên nhân quan trọng làm giảm lượng nước tự do trong hỗn hợp.

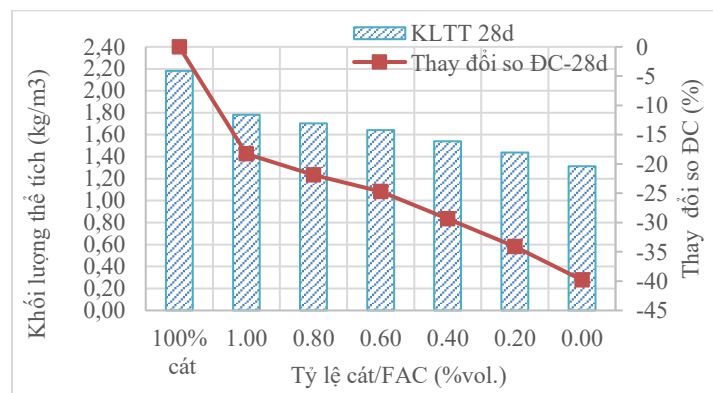
Trong trường hợp giữ cố định độ chảy xê của hỗn hợp bê tông trong khoảng  $180 \pm 5$  mm và các thông số cấp phối tỷ lệ N/CKD = 0,4 và hàm lượng CKD =  $750 \text{ kg/m}^3$  được giữ nguyên thì lượng phụ gia siêu dẻo đã phải điều chỉnh tăng lên theo hàm lượng FAC trong hệ như thể hiện trong Hình 3b.

#### 3.2. Khối lượng thể tích

Với tỷ lệ cát/FAC thay đổi từ 0 đến 100 %, tương ứng với hàm lượng FAC trong hỗn hợp bê tông thay đổi từ 42 đến 20 % (theo thể tích) thì có thể thấy khối lượng thể tích của bê tông ở trạng thái khô từ 1782 giảm xuống còn  $1312 \text{ kg/m}^3$ , trong khi mẫu đối chứng là  $2180 \text{ kg/m}^3$ , mức độ giảm tương ứng là 18,3 đến 39,8 % so với mẫu đối chứng (Hình 4). Như vậy, với tỷ lệ N/CKD = 0,4 và hàm lượng CKD =  $750 \text{ kg/m}^3$  thì KLTT nhỏ nhất đạt được là khoảng  $1312 \text{ kg/m}^3$ . Trong trường hợp muốn giảm khối lượng thể tích bê tông xuống dưới mức  $1312 \text{ kg/m}^3$ , thì có hai cách chủ yếu để giải quyết, thứ nhất vẫn cố định tỷ lệ N/CKD thì cần phải giảm hàm lượng chất kết dính để tăng hàm lượng FAC, ngược lại khi cố định hàm lượng CKD thì cần tăng tỷ lệ N/CKD, tuy nhiên khi đó cường độ của bê tông sẽ giảm.



Hình 3. Tính công tác của HHTB đánh giá thông qua độ chảy xòe.



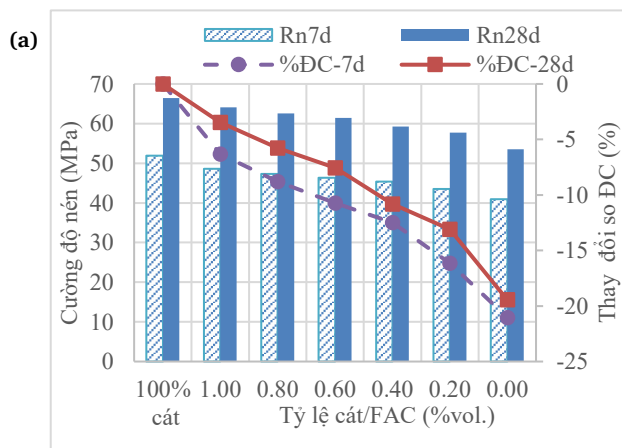
Hình 4. Ảnh hưởng của tỷ lệ FAC thay thế cát đến KLTT của FAC SLWC

### 3.3. Cường độ nén

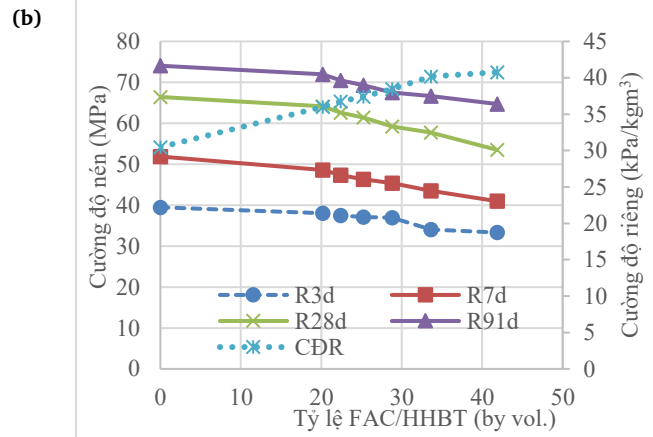
Khi xét đến ảnh hưởng của hàm lượng FAC đến cường độ FAC SLWC, từ kết quả thí nghiệm thể hiện trong Hình 5 có thể thấy, khi tăng tỷ lệ FAC trong thành phần thì cường độ nén của bê tông có xu hướng giảm ở các tuổi thí nghiệm 3, 7, 28 và 91 ngày. Cụ thể với tỷ lệ FAC khảo sát từ 0 đến 42% theo thể tích của HHTB thì cường độ nén tuổi 3, 7, 28 và 91 ngày của bê tông mẫu đối chứng tương ứng từ 39,5; 51,9; 66,4 và 74,1 MPa, giảm tương ứng 3,6; 6,3; 3,5; 2,9 % với cấp phối có tỷ lệ FAC 20% và giảm 15,6; 21,0; 19,4 và 12,6 % với cấp phối có tỷ lệ FAC 43%. Điều này cho thấy, hàm lượng FAC là yếu tố ảnh hưởng đến cường độ nén của FAC SLWC ở cả các tuổi sớm và tuổi muộn, tuy rằng mức độ giảm cường độ ở tuổi muộn thấp hơn so với tuổi sớm. Hiện tượng giảm cường độ của FAC SLWC khi sử dụng FAC thay thế một phần cát tự nhiên cũng đã được một số nghiên cứu chỉ ra và được giải thích do một số nguyên nhân chủ yếu sau. Đầu tiên phải kể đến đó là các hạt FAC có cấu tạo dạng hình cầu với lớp vỏ có thành phần chính là khoáng aluminosilicate ở dạng pha thủy tinh tương đối trơn nhẵn nên vùng tiếp xúc của chúng với đá xi măng (vùng ITZ) sẽ kém hơn so với các hạt cát tự nhiên, điều này được đã được một số nghiên cứu chỉ ra [11, 13]. Việc kết dính giữa các hạt FAC sẽ phụ thuộc nhiều vào phản ứng puzolanic giữa các khoáng silica vô định hình của FAC với canxi

hydroxyt (CH) sinh từ phản ứng thủy hóa của xi măng tạo nên khoáng hydro canxi silicate (CSH) và làm giảm lượng CH điều này sẽ giúp cải thiện tốt hơn vùng ITZ. Tuy nhiên, tốc độ phản ứng puzolanic xảy ra chậm so với phản ứng thủy hóa của xi măng và khi lượng FAC trong hệ tăng quá cao sẽ dư thừa so với nồng độ CH trong hệ để các phản ứng puzolanic có thể tiếp tục xảy ra. Ngoài ra, khi sử dụng hạt FAC, bê tông cũng được ghi nhận chứa nhiều lỗ rỗng bọt khí hơn. Điều này là do các hạt FAC có kích thước nhỏ, làm tăng đáng kể diện tích bề mặt trong hệ, khả năng thấm ướt vật liệu thấp, khi trộn bê tông sẽ tăng hàm lượng khí cuối vào hỗn hợp. Hiện tượng này cũng được chỉ ra trong nghiên cứu của Wang [12]. Tăng hàm lượng bọt khí, với các lỗ rỗng kích thước lớn cũng là nguyên nhân làm giảm cường độ của bê tông.

Một thông số nữa để đánh giá phẩm chất của vật liệu thường được sử dụng để đánh giá cho bê tông nhẹ là cường độ riêng, đó là tỷ số giữa cường độ và khối lượng thể tích của bê tông nhẹ. Đối với các cấp phối bê tông nhẹ nghiên cứu, kết quả thể hiện trong Hình 5a cho thấy, cường độ riêng tuổi 28 ngày của các mẫu bê tông nhẹ tăng tỷ lệ với thể tích của FAC trong hỗn hợp bê tông, cụ thể khi thể tích của FAC tăng từ 20 đến 42 % thì cường độ riêng bê tông dao động trong khoảng từ 36,0 đến 40,8 kPa/kgm<sup>3</sup> so với mẫu đối chứng là 30,5 kPa/kgm<sup>3</sup>, tương ứng mức độ tăng 19,9 đến 35,8% so với mẫu đối chứng.

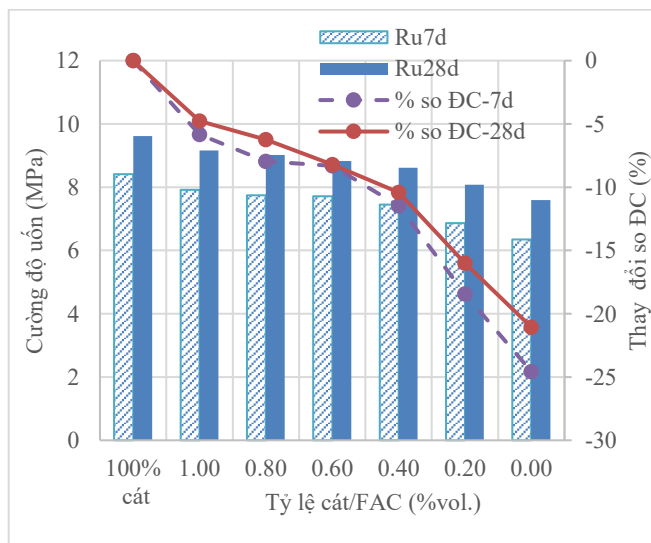


Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng FAC đến cường độ nén của FAC SLWC.



### 3.4. Cường độ uốn

Kết quả thí nghiệm cường độ uốn của FAC SLWC với ảnh hưởng của tỷ lệ cát/FAC khác nhau như thể hiện trong Hình 6 cho thấy, cường độ uốn của FAC SLWC cũng tương tự như cường độ nén, có xu hướng giảm khi tăng tỷ lệ FAC thay thế cát tự nhiên ở cả tuổi 7 và 28 ngày. Cường độ uốn của mẫu đối chứng tuổi 7 và 28 ngày tương ứng là 8,4 MPa và 9,6 MPa trong khi với hàm lượng FAC tăng từ 20 đến 42 % thì cường độ uốn giảm 5,8 đến 24,6 % ở tuổi 7 ngày và giảm 4,8 đến 21,1 % ở tuổi 28 ngày. Hiện tượng giảm cường độ uốn của FAC SLWC có thể giải thích là do sự dính kết kém hơn giữa đá xi măng và các hạt FAC tại vùng ITZ do tính chất bề mặt của các hạt FAC tương tự như với hiện tượng giảm cường độ nén đã giải thích ở trên. Tuy nhiên, cũng có thể thấy rằng, mức độ giảm cường độ uốn tuổi 28 ngày đã có xu hướng giảm so với ở tuổi 7 ngày. Điều này là do các phản ứng puzolanic giữa hạt FAC với CH trong hệ đã làm cải thiện vùng ITZ ở các tuổi dài ngày so với tuổi sớm.



Hình 6. Cường độ uốn của FAC SLWC với các hàm lượng FAC khác nhau.

### 3.5. Mô đun đàn hồi

Ảnh hưởng của hàm lượng FAC khi thay thế cát đến mô đun đàn hồi của FAC SLWC ở tuổi 7 và 28 ngày được thể hiện trong Hình 7a. Có thể thấy rõ ràng, khi giảm hàm lượng cát/FAC thì KLTT giảm và mô đun đàn hồi cũng giảm giảm. Mô đun đàn hồi từ 32,7 GPa của mẫu chứa cốt liệu 100 % cát (ĐC) giảm xuống còn 21,36 đến 13,41 GPa, tương ứng với mức giảm 34,7 đến 59,0 % khi tỷ lệ FAC thay thế cát tăng từ 20 đến 100 % (Hình 7b). So với giá trị 13,41 GPa của mô đun đàn hồi 28 ngày của cấp phối 100% FAC (RSO) thì mô đun đàn hồi bê tông tăng 9,5 % đến 59,3 % khi tỷ lệ cát/FAC tăng từ 20 đến 100 %. Mô đun đàn hồi của bê tông được cho là phụ thuộc chủ yếu vào mô đun đàn hồi của cốt liệu, do FAC là các hạt cầu rỗng, nên khi thay thế cát bởi FAC thì mô đun đàn hồi của bê tông sẽ giảm và sẽ phụ thuộc vào tỷ lệ FAC thay thế cát. Kết quả thí nghiệm này cho thấy, việc sử dụng kết hợp FAC và cát sẽ cải thiện đáng kể mức độ giảm mô đun đàn hồi của bê tông chỉ sử dụng cốt liệu là FAC. Các nghiên cứu về bê tông chỉ sử dụng FAC với vai trò làm cốt liệu ghi nhận mô đun đàn hồi của bê tông chủ yếu trong khoảng 6,6 đến 13,2 GPa tương ứng với cường độ nén trong khoảng 46 đến 65 Mpa [12, 14, 15]. Giá trị này thấp hơn so với kết quả mô đun khi sử dụng kết hợp FAC với cát trong nghiên cứu này.

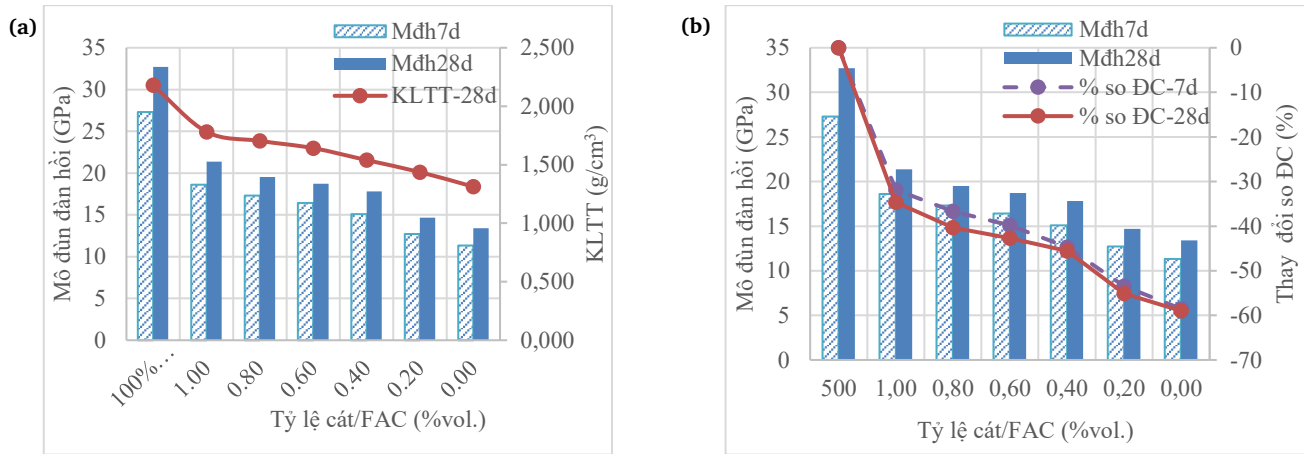
### 3.6. Độ hút nước

Kết quả thí nghiệm độ hút nước của FAC SLWC trong Hình 8 cho thấy, độ hút nước của bê tông giảm khi tăng tỷ lệ cát/FAC từ 0 đến 100 %. Độ hút nước của bê tông ở tuổi 7 và 28 ngày của mẫu đối chứng từ 4,6 và 4,4 % tăng lên 7,0 và 6,2 % ở mẫu bê tông chứa 100 % FAC (SO) theo thể tích, tương ứng với mức tăng độ hút nước ở mức 52,5 và 41,2 % ở tuổi 7 và 28 ngày tương ứng. Hiện tượng tăng độ hút nước của FAC SLWC khi tăng hàm lượng FAC trong thành phần có thể giải thích là do các hạt FAC có khả năng hấp thụ nước lớn hơn các hạt cát. Theo kết quả nghiên cứu của Barbare [16] thì các hạt FAC ở trạng thái cân bằng ẩm có thể hấp thụ lượng nước lớn hơn khoảng 18 lần so với cát, do cấu trúc xốp của

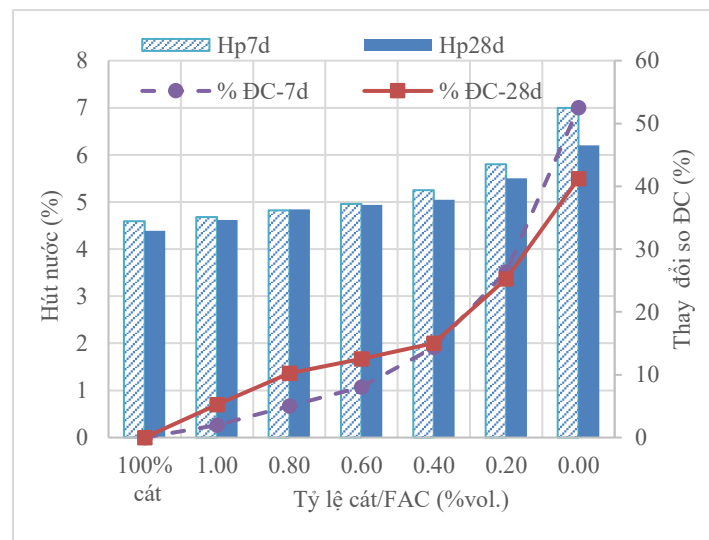


chúng. Chính vì vậy, bê tông chứa FAC sẽ hấp thụ lượng nước lớn hơn so với bê tông thông thường. Ngoài ra, tăng hàm lượng bột khí trong bê tông

khi sử dụng FAC cũng là có thể là nguyên nhân tăng độ hút nước của FAC SLWC.



Hình 7. Mô đun đàn hồi của FAC HSLWC.



Hình 8. Độ hút nước toàn phần của FAC SLWC với các hàm lượng FAC khác nhau.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu phát triển hệ bê tông nhẹ chịu lực sử dụng cenosphere (FAC SLWC) trên cơ sở sử dụng cốt liệu là hỗn hợp FAC và cát tự nhiên ở tỷ lệ cát/FAC là 20 đến 100 % theo thể tích, với chất kết dính là xi măng OPC kết hợp với 10 % SF đã được thực hiện. Thông qua nghiên cứu xác định một số tính chất của FAC SLWC, một số kết luận cho phép rút ra như sau:

- Sử dụng FAC từ tro bay nhà máy nhiệt điện thay thế toàn bộ hoặc một phần cát có khả năng chế tạo ra loại bê tông nhẹ đáp ứng các yêu cầu về cơ lý đối với bê tông nhẹ cho kết cấu chịu lực với độ hút nước thấp và cường độ riêng lớn hơn bê tông thường.
- Với các cấp phối FAC SLWC trong nghiên cứu này, bê tông nhẹ với tỷ lệ cát/FAC trong khoảng 20 đến 100 % (tương ứng với thể

tích FAC từ 20 đến 42 %) cho KLTT khô của bê tông trong khoảng 1312 đến 1782 kg/m³, cường độ nén trong khoảng 53,5 đến 64,1 MPa, cường độ uốn 7,6 đến 9,2 MPa, độ hút nước 4,6 đến 6,2 %, cường độ riêng 36 đến 40,8 kPa/kg.m³ ở tuổi 28 ngày.

- Sử dụng FAC kết hợp với cát cho chế tạo FAC SLWC có hiệu quả trong cải thiện về cường độ nén, đặc biệt là nâng cao cường độ uốn và mô đun đàn hồi của FAC SLWC so với việc chỉ sử dụng cốt liệu là FAC. Mức độ cải thiện cường độ uốn, mô đun đàn hồi tăng tương ứng với tỷ lệ cát thay thế FAC.

#### Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong khuôn khổ đề tài mã số NĐT.71.RU/19.

**Tài liệu tham khảo**

- [1]. *ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete*, 2014.
- [2]. *BS EN 1992-1-1:2004 -Eurocode 2 Design of concrete structures. General rules and rules for buildings*, 2004.
- [3]. *ACI 213R-14, Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*.
- [4]. Expanded Shale Clay and Slate Institute (ESCSI), "Reference Manual for the Properties and Applications of Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate,," ESCSI, Chicago, IL, USA2007.
- [5]. A. Zukri, R. Nazir, K. N. M. Said, and H. Moayedi, "Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA)," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 250, p. 01016: EDP Sciences.
- [6]. X. Liu, K. S. Chia, M.-H. J. C. Zhang, and C. Composites, "Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration," vol. 32, no. 10, pp. 757-766, 2010.
- [7]. N. Ranjbar and C. Kuenzel, "Cenospheres: A review," *Fuel*, vol. 207, pp. 1-12, 2017.
- [8]. A. Hanif, Z. Lu, and Z. Li, "Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review," *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 373-384, 2017.
- [9]. S. D. N. Bartake P. P., "Determination of crushing strength of cenospheres," *Journal of ASTM International*, v. 2, n. 7, pp 1 -9, 2005.
- [10]. F. Liu, J. Wang, X. Qian, and J. Hollingsworth, "Internal curing of high performance concrete using cenospheres," *Cement and Concrete Research*, vol. 95, pp. 39-46, 2017.
- [11]. S. K. Patel, H. P. Satpathy, A. N. Nayak, and C. R. Mohanty, "Utilization of fly ash cenosphere for production of sustainable lightweight concrete," *Journal of The Institution of Engineers* vol. 101, no. 1, pp. 179-194, 2020.
- [12]. Y. Wu, J.-Y. Wang, P. J. M. Monteiro, and M.-H. Zhang, "Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings," *Construction and Building Materials*, vol. 87, pp. 100-112, 2015.
- [13]. S. D. D. Montgomery, "The influence of fly ash cenospheres on the details of cracking in fly ash-bearing cement pastes (1984)," *Cem. Concr. Res. 14 (1984) 767-775*, 1984.
- [14]. A. Hanif, Z. Lu, S. Diao, X. Zeng, and Z. Li, "Properties investigation of fiber reinforced cement-based composites incorporating cenosphere fillers," *Construction and Building Materials*, vol. 140, pp. 139-149, 2017.
- [15]. E. V. Korolev and A. S. Inozemtcev, "Preparation and Research of the High-Strength Lightweight Concrete Based on Hollow Microspheres," *Advanced Materials Research*, vol. 746, pp. 285-288, 2013.
- [16]. N. Barbare, A. Shukla, and A. Bose, "Uptake and loss of water in a cenosphere-concrete composite material," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 10, pp. 1681-1686, 2003.