

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO BÊ TÔNG NHẹ CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG HẠT VI CẦU RỔNG TỪ TRO BAY

Lê Việt Hùng^a, Lê Trung Thành^a, Nguyễn Văn Tuấn^{b,*}

^a*Viện Vật liệu xây dựng, 235 đường Nguyễn Trãi, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

^b*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 14/10/2021, Sửa xong 10/11/2021, Chấp nhận đăng 12/11/2021

Tóm tắt

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo loại bê tông nhẹ cường độ cao (HSLWC) sử dụng cenospheres từ tro bay (FAC) với cường độ nén trên 40 MPa và khối lượng thể tích 1300-1600 kg/m³ (FAC-HSLWC). Hàm lượng FAC sử dụng thay thế cát với tỷ lệ 0, 50, 70 và 100% (theo thể tích). Ngoài ra, ảnh hưởng của phụ gia khoáng là silica fume (SF) và xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS) trong chất kết dính đến cường độ của FAC-HSLWC cũng được nghiên cứu. Kết quả thí nghiệm cho thấy, khi thay thế cát bởi FAC, khối lượng thể tích giảm và cường độ riêng tăng đáng kể. Sử dụng phụ gia khoáng SF và SF kết hợp GGBFS ở tỷ lệ 20-40% làm cải thiện cường độ nén và độ hút nước của bê tông, trong khi tỷ lệ GGBFS đến 60% mặc dù cải thiện độ hút nước nhưng làm giảm cường độ 28 ngày so với chỉ sử dụng OPC. Ngoài ra, tương tự các loại bê tông nhẹ khác, hệ số dẫn nhiệt của FAC-HSLWC giảm đáng kể và phụ thuộc chủ yếu vào tỷ lệ FAC thay thế cát hay khối lượng thể tích của bê tông.

Từ khoá: bê tông nhẹ chịu lực; bê tông nhẹ cường độ cao; cenospheres; hạt vi cầu rỗng từ tro bay; cốt liệu nhẹ; cường độ nén; độ hút nước; tính dẫn nhiệt.

EXPERIMENTAL STUDY TO PRODUCE HIGH-STRENGTH LIGHTWEIGHT CONCRETE USING FLY ASH CENOSPHERES

Abstract

This paper presents the experimental study to produce high-strength lightweight concrete (HSLWC) using fly ash cenospheres (FAC) with compressive strength over 40 MPa and a density in the range of 1300-1600 kg/m³ (FAC-HSLWC). The FAC contents of 0, 50, 70, and 100% were used to replace sand by volume. The effect of mineral admixtures, i.e., silica fume (SF) and granulated ground blast furnace slag (GGBFS) on the compressive strength of FAC-HSLWC was also investigated. Experimental results show that, replacing sand by FAC decreases the density and increases significantly specific strength despite reducing compressive strength, and water absorption of the concrete. The addition of the mineral admixtures SF and SF combined with 20-40% GGBFS improved compressive strength and water absorption, whereas the addition of up to 60% GGBFS was effective in improving water absorption but decreasing strength compared with the use of OPC only. Additionally, similar to other lightweight concretes, the thermal conductivity of FAC-HSLWC is significantly reduced and depends mainly on the replacement ratio of FAC or the density of the concrete.

Keywords: structural lightweight concrete; high-strength lightweight concrete; fly ash cenospheres; hollow microspheres; lightweight aggregate; compressive strength; water absorption; thermal conductivity.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-13) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tuannv@nuce.edu.vn (Tuấn, N. V.)

1. Giới thiệu

Bê tông nhẹ có lịch sử lâu đời từ hơn 2000 năm trước. Tại khu vực Địa Trung Hải, những công trình được xây dựng từ thời La Mã cổ đại như Căng Coca, mái vòm Pantheon và đấu trường La Mã đều sử dụng bê tông nhẹ. Trong giai đoạn này, cốt liệu cho bê tông nhẹ là các loại vật liệu nhẹ có nguồn gốc từ núi lửa. Đến đầu thế kỷ 20, khởi nguồn từ phát minh của Stephen J. Hayde (1908) - một nhà sản xuất gạch và gốm kỹ thuật (Viện ESCSI) đã cho ra đời các loại cốt liệu nhẹ nhân được nung phòng nổ từ đất, đá sét tạo thành cốt liệu sử dụng cho bê tông [1].

So với bê tông nặng thông thường, việc sử dụng bê tông nhẹ kết cấu mang lại nhiều lợi ích bao gồm giảm tải trọng cho công trình do đó tiết kiệm cho kết cấu nền móng và gia cố, giảm kích thước kết cấu, tăng diện tích hoặc số tầng của công trình; cải thiện tính chất nhiệt; cải thiện khả năng chống cháy; chống động đất, tiết kiệm trong vận chuyển, thi công, lắp đặt và chế tạo các cấu kiện đúc sẵn. Tuy vậy, bê tông cốt liệu nhẹ phổ biến hiện nay vẫn có những nhược điểm cố hữu làm hạn chế việc sử dụng rộng rãi vào làm kết cấu công trình như cường độ và cơ tính thấp, độ giòn cao (khả năng chống lại nứt gãy dưới tác động của ngoại lực); cấu trúc với độ xốp cao. Bên cạnh đó, sản xuất cốt liệu nhẹ nhân tạo cũng làm tiêu tốn năng lượng, khai thác tài nguyên và phát thải lượng lớn CO₂. Bê tông nhẹ kết cấu và bê tông nhẹ cường độ cao vẫn đang là hướng nghiên cứu được quan tâm để sử dụng cho công trình xây dựng hiện đại như nhà cao tầng, kết cấu nổi ngoài khơi, kết cấu cầu đường [2].

Theo ACI 318-14 [3], bê tông nhẹ kết cấu là loại bê tông cốt liệu nhẹ có cường độ từ 17 MPa trở lên, tiêu chuẩn Châu Âu (EN 1992 [4]) quy 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. Ngoài ra theo ACI 213 [2] thì bê tông nhẹ cường độ cao là loại bê tông nhẹ kết cấu có cường độ nén không thấp hơn 40 MPa. 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 phòng nổ. 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 nổ có cấu trúc xốp lớn. Độ hút nước của chúng phụ thuộc nhiều vào các cấu tạo của hệ thống lỗ rỗng, và thường có độ hút nước tương đối cao, từ 6-30% [5, 6]. 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 [7]. 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. Ngoài ra, để sản xuất được cốt liệu nhẹ phải trải qua nhiều công đoạn, điều này làm tăng giá thành và phát thải khí CO₂ trong quá trình sản xuất chúng. Cường độ của bê tông cốt liệu nhẹ phụ thuộc nhiều vào chất lượng, khối lượng thể tích của cốt liệu nhẹ, thông thường phổ biến trong khoảng 20-55 MPa tương ứng với khối lượng thể tích (KLTT) của bê tông 1440-1920 kg/m³ [8]. Các kết quả nghiên cứu về bê tông nhẹ cường độ cao có khả năng chế tạo cấu kiện chịu lực cho đến nay chủ yếu đạt được với khối lượng thể tích > 1800 kg/m³, nếu giảm khối lượng thể tích dưới 1800 kg/m³ thì cường độ nén bê tông thông thường chỉ đạt khoảng 30 MPa [9, 10]. Nhóm nghiên cứu của Nhật [11] đã phát triển loại bê tông nhẹ với khối lượng thể tích 1800-1850 kg/m³ và cường độ nén đạt được 47-54 MPa, tương ứng với cường độ riêng (tỷ số giữa cường độ nén với KLTT) là 0,0275-0,030 MPa/kg.m⁻³. Nhóm nghiên cứu của Brazil [10] cũng nghiên cứu được loại bê tông nhẹ có cường độ riêng tương tự sử dụng hạt xốp: khối lượng thể tích trung bình 1450-1600 kg/m³, cường độ nén 40-50 MPa. Để chế tạo được bê tông có cường độ trên 55 MPa với các tính năng đáp ứng cho chế tạo kết cấu bê tông cốt thép vẫn đang còn nhiều thách thức với các loại cốt liệu nhẹ truyền thống [12].

Các nghiên cứu về bê tông cốt liệu nhẹ cũng đã được thực hiện từ vài thập niên gần đây ở Việt Nam như bê tông cốt liệu keramzit [13-15], bê tông cốt liệu tro bay vôi viên [16], bê tông cốt liệu polystyrene phòng nổ [17-19]. Nhìn chung, các nghiên cứu đã nghiên cứu chế tạo loại bê tông ker-

amzit có khối lượng thể tích 1200-1900 kg/m³ và cường độ trong khoảng 15-40 MPa. Tuy nhiên, vấn đề sản xuất cốt liệu keramzit trong nước còn đang khó khăn, nguồn cung cấp chủ yếu từ nhập khẩu, do vậy giá thành cho loại bê tông này còn cao (đặc biệt với loại sử dụng cả cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ), ngoài ra bê tông này còn đòi hỏi những yêu cầu riêng về mặt thi công, bảo dưỡng so với bê tông thông thường và vấn đề giữ nước và thoát ẩm chậm, độ đồng nhất về cấu trúc của loại bê tông này cũng cần phải lưu ý khi sử dụng.

Bên cạnh các loại bê tông cốt liệu nhẹ phổ biến, bê tông nhẹ sử dụng hạt vi cầu rỗng từ tro bay (fly ash cenospheres-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 thường trong khoảng 0,4-0,9 g/cm³, 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 1-18 µm [20, 21]. Ngoài ra, các hạt cenosphere có lớp vỏ có khả năng chống thấm khí và nước [22], khả năng kháng nén dập của hạt khoảng 15,6-17,5 MPa [23], 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 FAC làm vi cốt liệu nhẹ cho chế tạo bê tông nhẹ là chủ đề được quan tâm, thực hiện khá nhiều trong những năm gần đây. Bê tông nhẹ sử dụng FAC (FAC LWC) được ghi nhận có khối lượng thể tích thấp và cường độ cao hơn so với các loại bê tông cốt liệu nhẹ truyền thống. FAC LWC cơ bản đáp ứng được tiêu chuẩn yêu cầu về cường độ với bê tông nhẹ kết cấu với dải KLTT từ khoảng 1100 kg/m³ trở lên.

Tuy nhiên, để chế tạo FAC LWC có một số khó khăn cần giải quyết đó là thành phần loại bê tông này chứa lượng lớn xi măng, các hạt mịn như FAC, cát, điều này dẫn đến diện tích bề mặt của các hạt vật liệu trong hệ lớn làm tăng lượng nước trộn và tỷ lệ N/XM. Ngoài ra, do độ hấp thụ nước của các FAC cũng lớn hơn cát nên cũng góp phần làm tăng lượng nước trộn. Các hạt FAC với đặc tính bề mặt nhám thấp, do vậy dẫn đến độ bám dính giữa bề mặt vi cầu và đá xi măng thấp. Điều này làm giảm tính liên kết trong vi cấu trúc bê tông dẫn đến ảnh hưởng độ bền lâu của bê tông. FAC LWC cũng được ghi nhận là có tính giòn, mô đun đàn hồi thấp, tương tự như các loại bê tông cốt liệu nhẹ khác. Vấn đề này xuất phát từ nguyên nhân, FAC LWC không có bộ khung cốt liệu đặc chắc như bê tông thông thường, FAC có kích thước nhỏ và độ rỗng lớn hơn so với cốt liệu thông thường. Ngoài ra, sử dụng hàm lượng xi măng lớn sẽ làm tăng lượng hồ xi măng trong hệ, dẫn đến tăng tính dòn và co ngót cho bê tông. Để nâng cao chất lượng của FAC-HSLWC, khắc phục các nhược điểm đó, việc thiết kế thành phần cấp phối và chế tạo loại bê tông này thường áp dụng các nguyên tắc sau: Giảm kích thước lớn nhất của cốt liệu để tăng độ đồng nhất cấu trúc bê tông, giảm lượng dùng chất kết dính bằng cách tối ưu hóa thành phần hạt cốt liệu, tăng độ đặc chắc cấu trúc và vùng ITZ bằng việc sử dụng PGK siêu mịn, và giảm co ngót, tăng khả năng kháng nứt bằng cách sử dụng cốt sợi phân tán. Đối với cốt liệu cho FAC LWC, các nghiên cứu chế tạo loại bê tông này hiện nay chủ yếu không sử dụng cốt liệu kích thước lớn, đặc chắc. Điều này tốt cho việc giảm KLTT, tránh phân tầng, đồng nhất cấu trúc của bê tông, nhưng có nhược điểm là tăng tính giòn và khả năng biến dạng dưới tải trọng của bê tông. Việc sử dụng các loại cốt liệu đặc chắc có kích thước nhỏ (thường 0,6 mm) tương tự như loại sử dụng cho bê tông siêu tính năng (UHPC) là giải pháp cân bằng cho các vấn đề vừa nêu. Sử dụng cốt sợi phân tán như sợi polypropylene để giảm co ngót, hạn chế nứt cho bê tông đã được nhiều các nghiên cứu thực hiện và đánh giá là hiệu quả [24–26]. Tỷ lệ sử dụng sợi polypropylene ở mức 0,25 đến 0,5% theo thể tích HSBT thường được ghi nhận là hiệu quả trong giảm co ngót, tăng kháng nứt của bê tông. Ở hàm lượng cao hơn (0,5%) không hiệu quả trong việc giảm co ngót, đồng thời giảm tính công tác và cường độ nén của bê tông [27, 28].

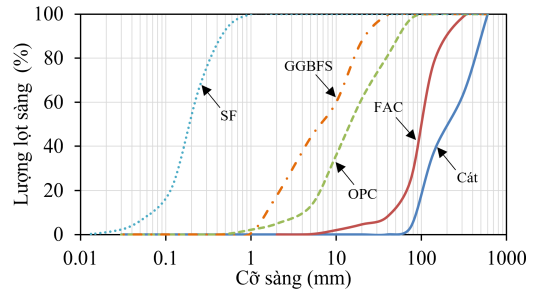
Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo bê tông nhẹ cường độ cao trên cơ sở sử dụng

vi cầu rỗng từ tro bay (FAC-HSLWC) và hệ chất kết dính đa cấu tử (xi măng kết hợp với phụ gia khoáng) được phát triển cho kết cấu bê tông nhẹ chịu lực với khối lượng thể tích trong khoảng 1300-1600 kg/m³, cường độ nén lớn hơn 40 MPa và so sánh với bê tông thông thường thông qua thông số cường độ riêng. Ngoài ra, các tính chất khác của FAC-HSLWC như độ hút nước và hệ số dẫn nhiệt cũng được nghiên cứu và so sánh với bê tông thông thường.

2. Vật liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

Cốt liệu gồm cát sông cỡ hạt 0,15-0,63 mm, cenospheres (FAC) từ tro bay nhà máy nhiệt điện. Chất kết dính gồm xi măng poóc lăng (OPC) loại PC50 theo TCVN 2682:2009 của Công ty xi măng Nghi Sơn, silica fume (SF) dạng hạt rời của hãng Elkem và xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS) loại S95 của Công ty CHC Việt Nam. Phụ gia siêu sê (PGSD) gốc polycarboxylate PCE loại F theo ASTM C494 được sử dụng để điều chỉnh tính công tác của HHTB. Sợi poly propylene (PP) dạng sợi tơ mảnh bó cụm với chiều dài 12-20 mm, khối lượng riêng 0,91 g/cm³, cường độ kéo 450 MPa, mô đun đàn hồi 3500 MPa được sử dụng cho nghiên cứu. Các tính chất cơ lý và thành phần hóa vật liệu sử dụng được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2 tương ứng. Thành phần hạt của vật liệu thể hiện trong Hình 1. Hình dạng các hạt FAC khi đổ đồng và khi phóng đại thể hiện trong Hình 2.



Hình 1. Thành phần hạt của vật liệu

Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng, silica fume, GGBFS, FAC, cát

Tính chất	OPC	GGBFS	SF	FAC	Cát
Khối lượng riêng, g/cm ³	3,10	2,90	2,16	0,786	2,62
Độ hút nước (trạng thái bão hòa khô bề mặt), %	-	-	-	10,3	3,2
Diện tích bề mặt, cm ² /g	3820	5090	29900	-	-
Kích thước hạt trung bình, μm	16,68	7,84	0,15	116	225

Bảng 2. Thành phần hóa của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

Vật liệu	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MKN
OPC	19,40	63,50	5,22	3,40	1,61	2,07	0,91	0,00	0,45	1,23
GGBFS	33,02	39,20	14,02	0,17	8,16	0,05	0,21	0,28	0,12	-0,49
FAC	61,40	0,28	26,61	2,79	1,81	0,01	3,91	0,82	-	0,27

MKN của GGBFS có giá trị âm (-0,49%) được cho là do trong thành phần GGBFS còn chứa lượng lưu huỳnh nhất định khi nung bị oxy hóa làm tăng khối lượng mẫu (mặc dù theo phương pháp phân tích đã hiệu chỉnh theo hàm lượng SO₃).



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

2.2. Cấp phối bê tông

Tổng cộng có 8 cấp phối được thiết kế sử dụng trong nghiên cứu này. Các cấp phối được chia ra thành 2 nhóm: (1) nhóm thay thế cát bằng FAC với tỷ lệ FAC/(cát+FAC) là 0, 50, 70 và 100% tính theo thể tích; và (2) nhóm sử dụng phụ gia khoáng (PGK) là SF và GGBFS. Các cấp phối có tỷ lệ N/CKD và hàm lượng CKD được cố định tương ứng là 0,4 và 750 kg/m³. Cốt sợi PP sử dụng ở tỷ lệ 0,5% theo thể tích hỗn hợp bê tông (HHBT). Để khảo sát ảnh hưởng của PGK đến tính chất bê tông, cấp phối đối chứng sử dụng CKD là OPC, các cấp phối sử dụng PGK gồm SF với tỷ lệ 10% và kết hợp với GGBFS với tỷ lệ 0, 20, 40 và 60%. Các cấp phối FAC-HSLWC khống chế độ chảy của HHBT trong khoảng 160-180 mm bằng cách sử dụng PGSD để điều chỉnh. Chi tiết thành phần cấp phối thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Tỷ lệ thành phần vật liệu FAC-HSLWC trong nghiên cứu

Cấp phối	Tỷ lệ FAC/ (cát+FAC), (%)	Tỷ lệ FAC (% theo thể tích)	Tỷ lệ N/CKD	Hàm lượng CKD (kg/m ³)	Thành phần CKD (%)			Hàm lượng sợi PP (% theo thể tích)
					OPC	SF	GGBFS	
FAC0	0	0	0,4	750	90	10	0	0,5
FAC20	50	20	0,4	750	90	10	0	0,5
FAC30	70	30	0,4	750	90	10	0	0,5
FAC40	100	40	0,4	750	90	10	0	0,5
OPC100	100	40	0,4	750	100	0	0	0,5
SF10GS0 ⁽¹⁾	100	40	0,4	750	90	10	0	0,5
SF10GS20	100	40	0,4	750	70	10	20	0,5
SF10GS40	100	40	0,4	750	50	10	40	0,5
SF10GS60	100	40	0,4	750	30	10	60	0,5

Chú thích: FAC, OPC, SF, GS trong ký hiệu cấp phối tương ứng là ký hiệu cenospheres, xi măng poóc lăng, SF và GGBFS; ⁽¹⁾ cấp phối SF10GS0 cũng chính là cấp phối FAC100.

2.3. 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: cát, cenospheres, 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 khoảng 2 phút, tiếp đó cho dần sợi PP vào hỗn hợp trộn đều

trong vòng 2 phút. Liều lượng PGSD được điều chỉnh để hỗn hợp bê tông đảm bảo tính công tác như mong muốn.

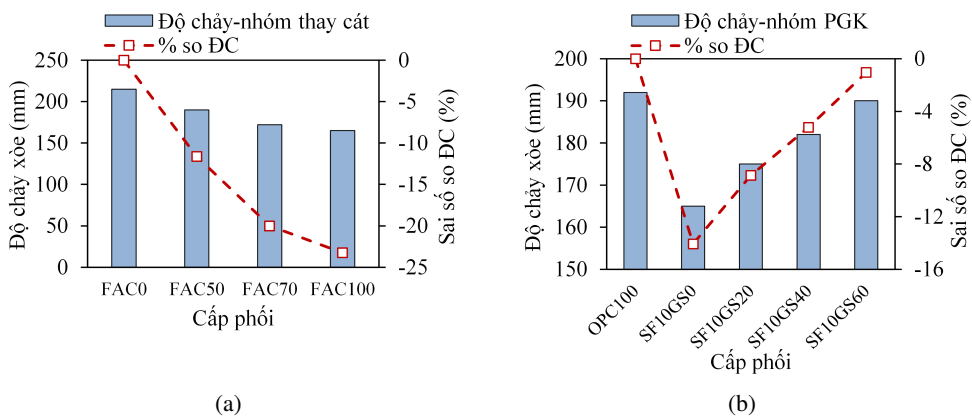
2.4. Phương pháp thí nghiệm

Độ chảy của HHTB được xác định theo tiêu chuẩn BS EN 1015-3:1999. Giá trị độ chảy được lấy bằng trung bình đường kính của hai lần đo vuông góc. Các mẫu thử được đúc trong khuôn thép, đầm chặt trên bàn rung và bảo dưỡng ẩm ở độ ẩm tương đối trên 95%, nhiệt độ 27 ± 2 °C. Cường độ nén được xác định với mẫu lập phương $100 \times 100 \times 100$ mm theo tiêu chuẩn BS EN 12390-3:2009. Khối lượng thể tích khô và độ hút nước được xác định với mẫu kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm 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 phân trăm chênh lệch khối lượng mẫu ẩm và mẫu khô của 3 mẫu thí nghiệm song song. Hệ số dẫn nhiệt được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C518-04. Mẫu thử nghiệm được đúc trong khuôn hình lăng trụ $300 \times 300 \times 55,3$ mm, và được bảo dưỡng điều kiện tiêu chuẩn đến 28 ngày. Sau đó được sấy khô ở nhiệt độ 105 ± 5 °C đến khối lượng không đổi trước khi tiến hành thí nghiệm.

3. Kết quả và bàn luận

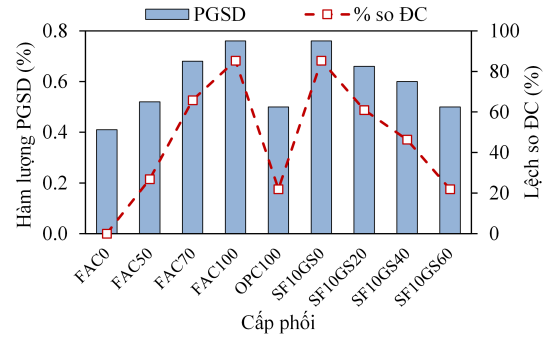
3.1. Tính công tác của hỗn hợp bê tông

Độ chảy của HHTB FAC-HSLWC với tỷ lệ N/CKD = 0,4 và hàm lượng PGSD được cố định 0,6% theo khối lượng CKD thể hiện trong Hình 3(a) cho thấy, khi hàm lượng FAC tăng thì HHTB có xu hướng giảm tính công tác khi đánh giá thông qua độ chảy xòe. Cụ thể, độ chảy xòe của HHTB của mẫu đối chứng là 215 mm giảm xuống còn 190 mm và 165 mm, tương ứng giảm khoảng 11,6 đến 22,3% so với mẫu đối chứng khi FAC thay thế cát ở tỷ lệ 50 đến 100%. Hiện tượng giảm tính linh động của HHTB có thể giải thích là do kích thước các hạt FAC nhỏ hơn cát nên khi thay thế cát bởi FAC thì tổng diện tích bề mặt trong hệ tăng lên do đó làm giảm lượng nước tự do trong hệ dẫn đến tính linh động của HHTB giảm. Ngoài ra, do đặc tính của các hạt FAC nên độ hút nước của FAC để đạt độ ẩm bão hòa cao hơn khá 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. Với các cấp phối sử dụng OPC kết hợp với SF và GGBFS, độ chảy xòe của HHTB giảm khi sử dụng SF 10%, tính lưu động của HHTB được cải thiện hơn khi sử dụng kết hợp SF với GGBFS ở các tỷ lệ 20, 40 và 60% (Hình 3(b)).



Hình 3. Tính công tác của HHTB FAC-HSLWC sử dụng (a) FAC, (b) hỗn hợp SF và GGBFS

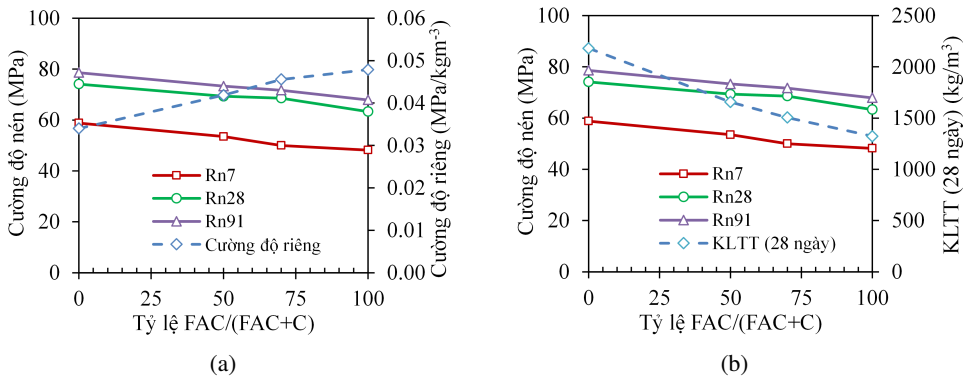
Trong trường hợp giữ cố định độ chảy xòe của HGBT trong khoảng 180 ± 5 mm thì lượng PGSD cần điều chỉnh tăng từ 0,41% đến 0,76% khi tỷ lệ FAC thay thế cát từ 0 đến 100%. Với các cấp phối sử dụng PGK, sử dụng SF10% thì lượng PGSD tăng từ 0,5% (OPC100) lên 0,76% (SF10GS0), lượng PGSD giảm khi sử dụng kết hợp SF với GG-BFS ở tỷ lệ 20 đến 60%.



Hình 4. Lượng PGSD để đạt cùng độ chảy xòe 180 ± 5 mm của HGBT

3.2. Khối lượng thể tích khô và cường độ nén

KLTT của FAC-HSLWC thể hiện trong Hình 5(a) cho thấy, khi tỷ lệ FAC thay thế cát trong HGBT tăng từ 0 (mẫu FAC0 - đối chứng) đến 50, 70 và 100% thì KLTT khô của bê tông tương ứng từ 2180 kg/m^3 giảm xuống còn 1656, 1505 và 1322 kg/m^3 , tương ứng với mức giảm là 24, 30,9 và 39,4%. Trong khi đó, khi thay thế cát bởi FAC thì cường độ nén của bê tông giảm khi tăng hàm lượng thể tích của FAC ở các tuổi khảo sát 7, 28 và 91 ngày. Cường độ nén tuổi 28 ngày của giảm từ 74,1 MPa (mẫu đối chứng) xuống còn 69,3, 68,6 và 63,3 MPa tương ứng với mức giảm 6,7, 7,4 và 14,6% khi tỷ lệ FAC/(FAC+C) tương ứng là 50, 70 và 100%. Sự giảm cường độ khi thay thế cát bởi FAC có thể giải thích là do các hạt FAC có bề mặt trơn nhẵn và độ rỗng cao nên ảnh hưởng đến cường độ nén của hệ. Hiện tượng giảm cường độ của FAC-HSLWC khi sử dụng FAC thay thế một phần cát tự nhiên cũng đã được một số nghiên cứu chỉ ra [29–32] 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 có lớp vỏ có thành phần chính là khoáng aluminosilicate ở dạng pha thủy tinh tương đối trơn nhẵn nên vùng tiếp giáp giữa đá xi măng và các hạt FAC (vùng ITZ) sẽ kém hơn so với các hạt cát tự nhiên, như trong một số nghiên cứu đã chỉ ra [33]. Khả năng liên kết giữa các hạt FAC và đá xi măng 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 (C-S-H) 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. Một lý

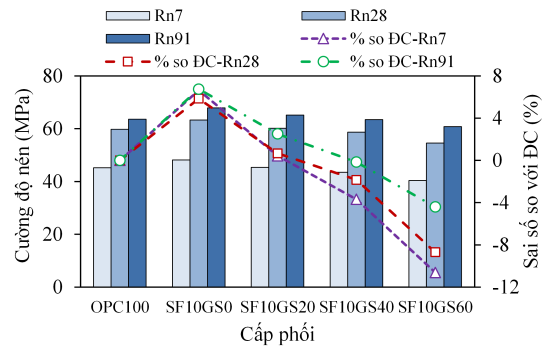


Hình 5. Ảnh hưởng của tỷ lệ FAC/(FAC+C) đến cường độ nén với (a) KLTT ở tuổi 28 ngày và với (b) cường độ riêng của FAC-HSLWC

do nữa liên quan đến độ rỗng trong bê tông khi sử dụng FAC. Khi sử dụng hạt FAC thì lượng khí cuốn vào HHTB tăng lên, hình thành nên các lỗ rỗng bọt khí điều này là do các hạt FAC có kích thước nhỏ, làm tăng đáng kể diện tích bề mặt trong hệ, điều này làm giảm khả năng thấm ướt vật liệu của dung dịch trong hệ dẫn đến tăng hàm lượng bọt khí. Hiện tượng này cũng được chỉ ra trong nghiên cứu của Wang [34]. Các hạt 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 cho bê tông nhẹ là cường độ riêng, đó là tỷ số giữa cường độ nén và khối lượng thể tích khô của bê tông. Đối với các cấp phối FAC-HSLWC nghiên cứu, kết quả thể hiện trong Hình 5(b) cho thấy, cường độ riêng của các mẫu bê tông nhẹ tăng tỷ lệ với thể tích của FAC trong HHTB, cụ thể cường độ riêng của mẫu FAC0 từ 0,034 MPa/kg.m⁻³ tăng lên 0,418, 0,0456 và 0,0479 MPa/kg.m⁻³ tương ứng với mức tăng 12,3, 34,1, 40,9% khi tỷ lệ FAC thay thế cát là 50, 70 và 100%.

Ảnh hưởng của loại PGK trong CKD đến cường độ nén của FAC-HSLWC thể hiện trong Hình 6 cho thấy, khi SF thay thế OPC ở tỷ lệ 10% thì cường độ của bê tông tăng ở các tuổi khảo sát là 7, 28 và 91 ngày, mức độ tăng tương ứng là 6,6, 5,6 và 6,8%. Khi thay thế một phần OPC với PGK là SF và GGBFS ở tỷ lệ GGBFS 20, 40 và 60% thì cường độ 7, 28, 91 ngày đều giảm so với mẫu chứa 10% SF (mẫu 10SFGS0). Tuy nhiên khi so sánh các mẫu chứa GGBFS với mẫu OPC (OPC100) thì ở tỷ lệ GGBFS từ 20-40%, cường độ nén ở tuổi 28 và 91 ngày là tương đương, trong khi ở tỷ lệ 60% GGBFS cường độ thấp hơn với mẫu OPC khoảng 8,7 và 4,4% ở tuổi 28 và 91 ngày tương ứng. Cường độ riêng của các cấp phối sử dụng 20-60% GGBFS trong khoảng 0,0423-0,046 MPa/kg.m⁻³, không chênh lệch nhiều so với 0,0444 MPa/kg.m⁻³ của cấp phối OPC100.



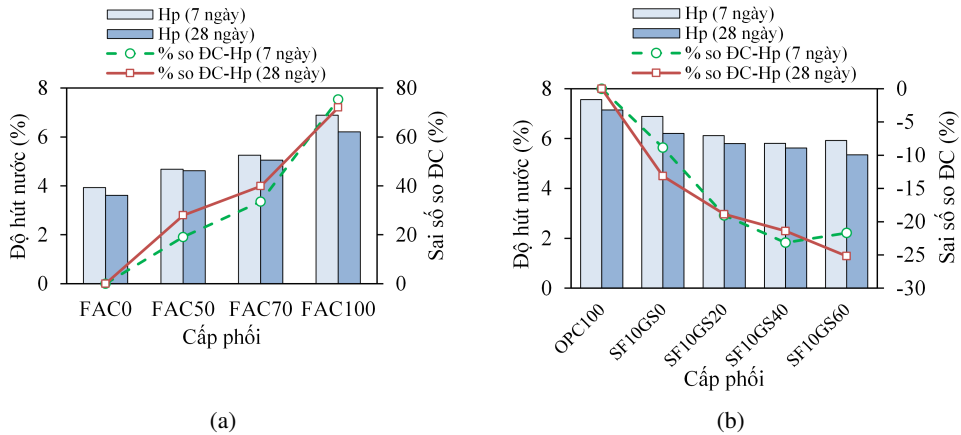
Hình 6. Cường độ nén của FAC-HSLWC khi sử dụng OPC và hỗn hợp PGK

3.3. Độ hút nước

Độ hút nước (H_p) của FAC-HSLWC với khi thay thế cát bởi FAC ở các tỷ lệ khác nhau thể hiện trong Hình 7(a) cho thấy, độ hút nước tăng khi tăng hàm lượng FAC. Độ hút nước tuổi 28 ngày từ 3,61% của mẫu đối chứng (FAC0) tăng lên 28,0, 39,9 và 71,7% tương ứng với tỷ lệ FAC thay thế cát 50, 70 và 100%. Hiện tượng tăng độ hút nước của FAC-HSLWC khi tăng hàm lượng FAC có thể giải thích là do các hạt FAC có khả năng hấp thụ nước lớn hơn các hạt cát. Kết quả thí nghiệm cho thấy độ hút nước của FAC là 10,3% so với 3,2% của cát. Chính vì vậy, bê tông chứa FAC sẽ hấp thụ lượng nước lớn hơn so với bê tông thông thường. Điều này sẽ làm tăng hệ thống lỗ rỗng trong đá xi măng khi một phần lượng nước trộn bay hơi để lại. Một nguyên nhân nữa cũng có thể ảnh hưởng đến độ hút nước của bê tông là khả năng cuốn khí của HHTB tăng lên khi FAC thay thế cát, do các hạt FAC có kích thước nhỏ hơn cát, làm tăng tổng diện tích bề mặt trong hệ, điều này cũng được một số nghiên cứu chỉ ra thông qua xác định độ xốp của bê tông FAC. Hiện tượng tăng lượng nước hấp thụ khi hàm lượng FAC tăng cũng được một số nghiên cứu khác chỉ ra [35, 36].

Khi sử dụng SF thay thế OPC, độ hút nước ở tuổi 7 và 28 ngày đều giảm, mức giảm 8,9 và 13,1% tương ứng ở tuổi 7 và 28 ngày so với mẫu OPC100. Khi sử dụng tiếp tục GGBFS thay thế OPC, độ hút nước của FAC-HSLWC giảm tăng thêm tương ứng với mức tăng hàm lượng GGBFS từ 20-60% ở cả tuổi 7 và 28 ngày. Mức độ giảm độ hút nước đạt được tốt nhất ở tỷ lệ GGBFS 60%, độ hút

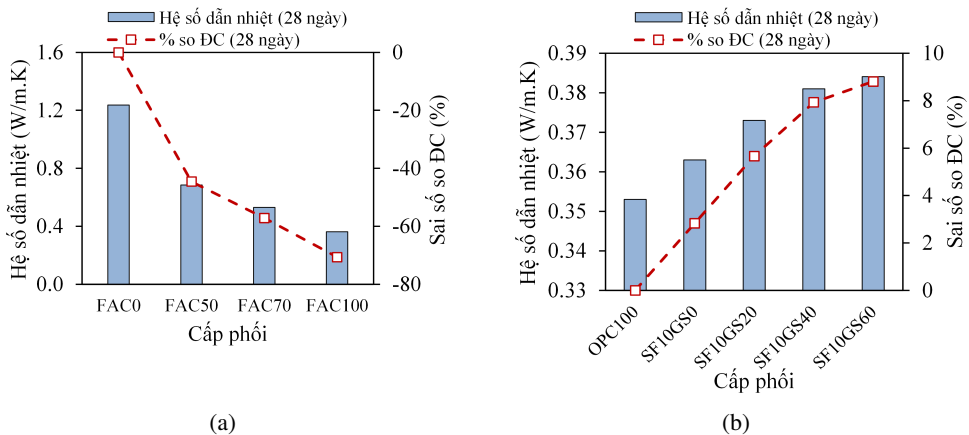
nước giảm từ 7,15% của mẫu đối chứng (OPC100) xuống còn 5,35% tương ứng với mức giảm 25,2% (Hình 7(b)).



Hình 7. Mối quan hệ giữa độ hút nước toàn phần của FAC-HSLWC với các mẫu chứa (a) FAC và (b) hỗn hợp SF và GGBFS

3.4. Hệ số dẫn nhiệt

Các công trình xây dựng ngày càng được chú trọng đến hiệu quả tiết kiệm năng lượng. Một trong các thông số quan trọng ảnh hưởng đến truyền nhiệt của công trình xây dựng là hệ số truyền nhiệt của các vật liệu bao che. Đối với bê tông nhẹ, một trong ưu điểm nổi bật của nó là khả năng dẫn nhiệt thấp do chứa các lỗ rỗng khí. Tuy nhiên, độ dẫn nhiệt của các loại bê tông nhẹ là không giống nhau, ngoài phụ thuộc vào khối lượng thể tích của nó, còn phụ thuộc vào các yếu tố khác như loại và hàm lượng cốt liệu, tính chất của đá xi măng, kích thước và phân bố lỗ rỗng. Đối với FAC-HSLWC, kết quả xác định hệ số dẫn nhiệt thể hiện trong Hình 8(a) cho thấy, hệ số dẫn nhiệt giảm đáng kể từ 1,236 W/m.K của mẫu đối chứng (FAC0) xuống còn 0,685, 0,530 và 0,363 W/m.K, tương đương với mức giảm 44,6,



Hình 8. Mối quan hệ giữa hệ số dẫn nhiệt của FAC-HSLWC với các mẫu chứa (a) FAC, và (b) hỗn hợp SF và GGBFS

57,1 và 70,6% khi thay thế cát bởi FAC ở tỷ lệ 50, 70 và 100%. Lưu ý rằng, mẫu đối chứng FAC0 ở đây là mẫu bê tông cốt liệu là cát, với bê tông có cốt liệu gồm cả đá và cát thì hệ số dẫn nhiệt khoảng 1,98 W/m.K, hoặc có thể cao hơn từ 2,6-2,7 như với cốt liệu đá granit [8]. Độ dẫn nhiệt của đá xi măng đã được một số nghiên cứu chỉ ra trong khoảng 0,6-0,73 với tỷ lệ N/XM trong khoảng 0,36-0,84 [37] hay 0,8-0,84 khi kết hợp OPC với SF [8]. Điều này cũng giải thích vì sao khi tăng hàm lượng các hạt vi cầu rỗng FAC, KLTT của bê tông giảm thì hệ số dẫn nhiệt cũng giảm.

Với các cấp phối sử dụng OPC kết hợp với phụ gia khoáng SF và GGBFS trong Hình 8(b) cho thấy, hệ số dẫn nhiệt có xu hướng giảm tăng nhẹ khi sử dụng hai loại phụ gia khoáng này, tuy nhiên mức độ tăng không lớn, mức độ tăng lớn nhất đạt 8,8% với phụ gia khoáng là SF10% và GGBFS 60%. Độ dẫn nhiệt của bê tông tăng khi sử dụng SF, GGBFS có thể giải thích là do ảnh hưởng của các loại PGK này làm đặc chắc hơn cấu trúc của đá xi măng.

Mối quan hệ giữa KLTT và hệ số dẫn nhiệt của bê tông đã được nhiều nghiên cứu đưa ra. Hệ số dẫn nhiệt bê tông có thể dự đoán theo KLTT khô của bê tông cùng với ảnh hưởng của loại cốt liệu [38]. ACI 213-14 đưa ra công thức dự đoán hệ số dẫn nhiệt của bê tông từ kết quả nghiên cứu của Vahore [39]:

$$k = 0,072e^{0,00125W_c} \quad (1)$$

trong đó, k là hệ số dẫn nhiệt (W/m.K), W_c là KLTT khô của bê tông (kg/m^3).

Khi so sánh kết quả thí nghiệm hệ số dẫn nhiệt FAC-HSLWC trong nghiên cứu này với kết quả tính toán hệ số dẫn nhiệt theo công thức (1) cho thấy, công thức dự đoán hệ số dẫn nhiệt (1) của Vahore cho kết quả thấp hơn so với thực tế. Phương trình hồi quy từ kết quả thí nghiệm dựa trên công thức của Vahore giữa hệ số dẫn nhiệt và KLTT của FAC-HSLWC như trong công thức (2) cho hệ số tương quan $R^2 = 0,9835$ (Hình 9).

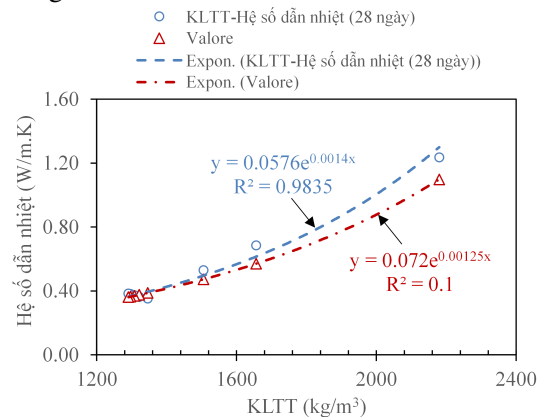
$$k = 0,0567e^{0,0014W_c} \quad (2)$$

4. Kết luận

Nghiên cứu phát triển hệ bê tông nhẹ cường độ cao sử dụng cenosphere (FAC-HSLWC) với các biến gồm tỷ lệ FAC thay thế cát tự nhiên từ 0 đến 100%; sử dụng xi măng OPC kết hợp các loại PGK khác nhau gồm SF và SF kết hợp với GGBFS đã được thực hiện. Thông qua nghiên cứu xác định một số tính chất của FAC-HSLWC, một số kết luận cho phép rút ra như sau:

- Thay thế cát bởi FAC làm giảm đáng kể KLTT, làm giảm cường độ nén, nhưng cường độ riêng của FAC-HSLWC tăng. Với tỷ lệ N/CKD = 0,4 và CKD = 750 kg/m^3 trong nghiên cứu này, khi thay thế cát bởi FAC từ 50 đến 100% làm giảm KLTT tương ứng từ 24 đến 39,4%, cường độ nén tuổi 28 ngày giảm 6,7 đến 14,6%, nhưng cường độ riêng của FAC-HSLWC tăng từ 12,3 đến 40,9%.

- Sử dụng 10% SF, 10% SF kết hợp với GGBFS ở tỷ lệ 20-40% thay thế OPC làm tăng hoặc cho cường độ tương đương, trong khi tăng tỷ lệ GGBFS đến 60% làm giảm khoảng 8,7% cường độ 28 ngày của FAC-HSLWC so với mẫu đối chứng OPC.



Hình 9. Quan hệ KLTT và hệ số dẫn nhiệt của FAC-HSLWC

- Độ hút nước của FAC-HSLWC tăng khi FAC thay thế cát, sử dụng OPC kết hợp với các loại PGK là SF và GGBFS làm giảm độ hút nước, trong đó sử dụng PGK gồm 10% SF kết hợp với 60% GGBFS cho hiệu quả cải thiện tốt nhất, mức giảm khoảng 25,2% so mẫu đối chứng OPC.

- Hệ số dẫn nhiệt của bê tông giảm đáng kể khi sử dụng FAC thay thế cát, mức độ giảm đến 70,6% khi thay thế hoàn toàn cát bằng FAC trong nghiên cứu này. Hệ số dẫn nhiệt tỷ lệ thuận với hàm lượng FAC, cũng như KLTT. Có thể dự đoán hệ số dẫn nhiệt từ KLTT của FAC-HSLWC với hệ số tương đồng khá cao.

Tài liệu tham khảo

- [1] Expanded Shale Clay and Slate Institute (ESCSI) (1971). *Lightweight Concrete-History, Application and Economics*. ESCSI, Chicago, IL, USA.
- [2] ACI 213R-14 (2014). *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. ACI Committee 213.
- [3] ACI 318-14 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Institute of Concrete (ACI).
- [4] BS EN 1992-1-1:2004. *Eurocode 2 Design of concrete structures. General rules and rules for buildings*. BSI.
- [5] Zukri, A., Nazir, R., Said, K. N. M., Moayedi, H. (2018). [Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate \(LECA\)](#). *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 250:01016.
- [6] Expanded Shale Clay and Slate Institute (ESCSI) (2007). *Reference Manual for the Properties and Applications of Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate*. ESCSI, Chicago, IL, USA.
- [7] Liu, X., Chia, K. S., Zhang, M.-H. (2010). [Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration](#). *Concrete Composites*, 32(10):757–766.
- [8] Wu, Y., Wang, J.-Y., Monteiro, P. J., Zhang, M.-H. (2015). [Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings](#). *Construction and Building Materials*, 87:100–112.
- [9] Alduaij, J., Alshaleh, K., Haque, M. N., Ellaithy, K. (1999). [Lightweight concrete in hot coastal areas](#). *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6):453–458.
- [10] Rossignolo, J. A., Agnesini, M. V. C., Morais, J. A. (2003). [Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates](#). *Cement and Concrete Composites*, 25(1):77–82.
- [11] Harima, I. (2004). Evaluation of fatigue durability precast PC slab lightweight high-strength. *Technical Report Ishikawajimahirima*.
- [12] Moreno, D., Zunino, F., Paul, Á., Lopez, M. (2014). [High strength lightweight concrete \(HSLC\): Challenges when moving from the laboratory to the field](#). *Construction and Building Materials*, 56:44–52.
- [13] Nghị, N. Đ., và cs. (1995). *Báo cáo tổng kết đề tài "Nghiên cứu công nghệ sản xuất keramzit và bê tông keramzit"*. Mã số RD94-30 Bộ Xây dựng, Viện Vật liệu xây dựng.
- [14] Đình, N. V. (2001). *Nghiên cứu chế tạo bê tông nhẹ cốt liệu rỗng*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng.
- [15] Hiếu, N. D. (2010). *Nghiên cứu chế tạo bê tông keramzit chịu lực độ chảy cao*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng.
- [16] Thiên, B. Đ., và cs. (2019). *Nghiên cứu sử dụng tro bay sản xuất cốt liệu nhẹ dùng chế tạo tấm tường rỗng bê tông đúc sẵn theo công nghệ rung ép hoặc đùn ép*. Đề tài RD 105-16, Bộ Xây dựng.
- [17] Đích, N. T., và cs. (2001). *Báo cáo tổng kết đề tài "Nghiên cứu sử dụng vật liệu nhẹ cho nhà và công trình"*. Mã số RDN 06-01 Bộ Xây dựng, Viện Khoa học công nghệ Xây dựng.
- [18] Đích, N. T., và cs. (2004). *Báo cáo tổng kết đề tài Mã số RDN 06 - 01 "Nghiên cứu sử dụng vật liệu nhẹ cho nhà và công trình"*. Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng.
- [19] Ly, L. P. *Nghiên cứu chế tạo bê tông nhẹ kết cấu sử dụng cốt liệu polystyrene*. Luận án tiến sĩ, Viện Khoa học và công nghệ xây dựng, Hà Nội.
- [20] Ranjbar, N., Kuenzel, C. (2017). [Cenospheres: A review](#). *Fuel*, 207:1–12.
- [21] Hanif, A., Lu, Z., Li, Z. (2017). [Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites – A review](#). *Construction and Building Materials*, 144:373–384.

- [22] Dean, S. W., Bartake, P. P., Singh, D. N. (2005). [Determination of Crushing Strength of Cenospheres](#). *Journal of ASTM International*, 2(7):13092.
- [23] Liu, F., Wang, J., Qian, X., Hollingsworth, J. (2017). [Internal curing of high performance concrete using cenospheres](#). *Cement and Concrete Research*, 95:39–46.
- [24] Zhang, P., fu Li, Q. (2013). [Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume](#). *Composites Part B: Engineering*, 45(1):1587–1594.
- [25] Aly, T., Sanjayan, J. G., Collins, F. (2008). [Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes](#). *Materials and Structures*, 41(10):1741–1753.
- [26] Kayali, O., Haque, M. N., Zhu, B. (1999). [Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash](#). *Cement and Concrete Research*, 29(11):1835–1840.
- [27] Saje, D., Bandelj, B., Šušteršič, J., Lopatič, J., Saje, F. (2011). [Shrinkage of Polypropylene Fiber-Reinforced High-Performance Concrete](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7):941–952.
- [28] Mohamed, R. A. S. (2006). [Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete](#). *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, 34(4):1049–1059.
- [29] Hanif, A., Lu, Z., Diao, S., Zeng, X., Li, Z. (2017). [Properties investigation of fiber reinforced cement-based composites incorporating cenosphere fillers](#). *Construction and Building Materials*, 140:139–149.
- [30] Pichór, W. (2009). Properties of fiber reinforced cement composites with cenospheres from coal ash. *Brittle Matrix Composites*, Elsevier, 245–254.
- [31] de Souza, F. B., Montedo, O. R. K., Grassi, R. L., Antunes, E. G. P. (2019). [Lightweight high-strength concrete with the use of waste cenosphere as fine aggregate](#). *Matéria*, 24(4).
- [32] McBride, S. P., Shukla, A., Bose, A. (2002). [Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres](#). *Journal of Materials Science*, 37(19):4217–4225.
- [33] Montgomery, D., Diamond, S. (1984). [The influence of fly ash cenospheres on the details of cracking in flyash-bearing cement pastes](#). *Cement and Concrete Research*, 14(6):767–775.
- [34] Wang, J.-Y., Chia, K.-S., Liew, J.-Y. R., Zhang, M.-H. (2013). [Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content](#). *Cement and Concrete Composites*, 43:39–47.
- [35] Patel, S. K., Satpathy, H. P., Nayak, A. N., Mohanty, C. R. (2019). [Utilization of Fly Ash Cenosphere for Production of Sustainable Lightweight Concrete](#). *Journal of The Institution of Engineers*, 101(1): 179–194.
- [36] Barbare, N., Shukla, A., Bose, A. (2003). [Uptake and loss of water in a cenosphere–concrete composite material](#). *Cement and Concrete Research*, 33(10):1681–1686.
- [37] Baghban, M. H., Hovde, P. J., Jacobsen, S. (2012). [Analytical and experimental study on thermal conductivity of hardened cement pastes](#). *Materials and Structures*, 46(9):1537–1546.
- [38] ACI 122R-14 (2002). *Guide to thermal properties of concrete and masonry systems*. ACI Committee 122.
- [39] Valore, R. C. (1980). Calculations of U-values of hollow concrete masonry. *Concrete International*, 2(2): 40–63.