

TỐI ƯU HÓA THÀNH PHẦN BÊ TÔNG SỬ DỤNG TRO XỈ NHIỆT ĐIỆN VÀ BỘT NGÓI ĐẤT SÉT NUNG Ở NHIỆT ĐỘ CAO

Đỗ Thị Phương^{a,*}, Vũ Minh Đức^b

^aKhoa Xây dựng Cầu đường, trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng,
54 đường Nguyễn Lương Bằng, Đà Nẵng, Việt Nam

^bKhoa 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 30/6/2021, Sửa xong 07/11/2021, Chấp nhận đăng 09/11/2021

Tóm tắt

Bê tông sử dụng xi măng poóc-lăng là một trong những loại vật liệu phổ biến trong xây dựng. Tuy nhiên, với những công trình chịu tác động của nhiệt độ cao thì cấu trúc bê tông dễ bị phá hủy nghiêm trọng dưới ảnh hưởng của nhiệt độ. Bài báo giới thiệu một số tính chất cơ lý của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao bao gồm cốt liệu từ tro xỉ nhiệt điện, chất kết dính từ xi măng poóc-lăng (PC) và các phụ gia khoáng tro bay (FA), bột ngói đất sét nung (FGT) với tỷ lệ FA/FGT/PC = 22/12,3/65,7 (% theo khối lượng). Kết quả thể hiện bê tông có cường độ nén 15 MPa, khối lượng thể tích 1447,5 kg/m³ và độ co ngót 0,27% ở 800 °C. Thành phần tối ưu của bê tông được xác định với tỷ lệ nước/chất kết dính là 0,54 và thành phần hạt cốt liệu với giá trị tính toán n là 0,358.

Từ khóa: bê tông; tro xỉ nhiệt điện; tro bay; bột ngói đất sét nung; nhiệt độ cao.

OPTIMIZATION OF CONCRETE COMPOSITION USING COAL ASHES AND FINELY GROUND CLAY TILE EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE

Abstract

Concrete using Portland cement is one of the most popular building materials. However, for buildings exposed to high temperatures, the structure of concrete is severely damaged under the influence of temperature. The paper presents the mechanical and physical properties of concrete exposed to high temperature with coal ash as an aggregate (CA), binder of Portland cement (PC) with fly ash (FA) and finely ground clay tile (FGT), FA/FGT/PC ratio = 22/12.3/65.7 (% by mass). The results demonstrated that the concrete has a compressive strength of 15 MPa, a bulk density of 1447.5 kg/m³ and a shrinkage of 0.27% at 800 °C. The optimum composition of the concrete was determined with a water-binder ratio of 0.54 and aggregate particle size distribution with the calculated value of $n = 0.358$.

Keywords: concrete; coal ash; fly ash; finely ground clay tile; high temperature.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-11) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Bê tông sử dụng xi măng poóc-lăng là một trong những loại vật liệu phổ biến nhất trong xây dựng. Tuy nhiên, với những công trình chịu tác động của nhiệt độ cao thì việc sử dụng bê tông thường sẽ không mang lại hiệu quả, bê tông dễ bị phá hủy nghiêm trọng cấu trúc dưới ảnh hưởng của nhiệt độ [1–4]. Khi nhiệt độ tăng đến 540 °C, xảy ra sự mất nước liên kết cùng sự phân hủy các khoáng

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: dtphuong@dut.udn.vn (Phương, Đ. T.)

$C-S-H$, $CaSO_4 \cdot H_2O$, $Ca(OH)_2$ [2]. Một vài cốt liệu silicat bị phá vỡ ở khoảng $350^\circ C$ và có sự biến đổi thù hình của quặng ở khoảng $500-600^\circ C$ [5]. Sự phân hủy tiếp theo của $C-S-H$, dolomit, canxit khi tăng nhiệt đến $960^\circ C$ và bê tông bị phá hủy hoàn toàn khi nhiệt độ lớn hơn $1200^\circ C$ [2].

Các cốt liệu nhân tạo như keramzit, agloporit, peclit, forsterit, sa mốt, mulit, mảnh vỡ gạch cao alumin có thể chế tạo bê tông làm việc đến nhiệt độ lớn hơn $800^\circ C$ [6, 7]. Một số cốt liệu tự nhiên như đá bazan, diaba thích hợp chế tạo bê tông làm việc ở nhiệt độ nhỏ hơn $600^\circ C$ [6, 8]. Tác giả Aydin [9] cho rằng đá bọt có thể chế tạo bê tông làm việc ở khoảng $900^\circ C$. Các cốt liệu là phế liệu, phế thải như gạch ngói đất sét nung, xỉ lò cao, xỉ đáy lò có thể chế tạo bê tông làm việc đến $800^\circ C$, tùy theo loại chất kết dính [8, 10, 11].

Sự mất nước của các khoáng thủy hóa của xi măng poóclăng (PC) ở nhiệt độ cao đặc biệt là sự thủy hóa lần hai của oxyt canxi sẽ gây nở thể tích dẫn đến nứt vỡ sản phẩm. Các loại phụ gia khoáng bao gồm hàm lượng SiO_2 và Al_2O_3 lớn sẽ cải thiện khả năng chịu nhiệt của PC [12]. Một số các phụ gia khoáng như gạch đất sét nung nghiền mịn, tro bay, silica fume, xỉ lò cao, meta cao lanh, đá bọt, ... được nghiên cứu sử dụng cho PC cũng như bê tông làm việc ở nhiệt độ cao, đặc biệt dưới dạng phụ gia khoáng hỗn hợp. Tác giả Heikal và cs. [13] công bố rằng mẫu chất kết dính chứa 5% tro bay và 15% silica fume cho cường độ nén cao nhất ở $450^\circ C$. Ông cũng cho rằng, mẫu chất kết dính chứa 70% PC cùng 10% xỉ lò cao, 10% bột gạch đất sét nung và 10% silica fume có thể làm việc đến $800^\circ C$ [14]. Một nghiên cứu khác chỉ ra rằng bê tông sử dụng đá bọt và tro bay không bị suy giảm cường độ ở nhiệt độ $600^\circ C$ [15]. Tác giả Demirel và cs. [16] nghiên cứu bê tông dùng phụ gia hỗn hợp là xỉ bọt và silica fume dưới ảnh hưởng của nhiệt độ cao, cho rằng nhiệt độ làm việc tốt nhất cho các mẫu bê tông là $600^\circ C$.

Một trong những hướng phát triển và cải thiện tính chất của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao là dựa trên việc sử dụng các vật liệu từ phế thải công nghiệp. Về mặt này, có nhiều nghiên cứu được báo cáo trong những năm gần đây [8, 10, 11, 15, 16]. Tuy nhiên, bê tông làm việc ở nhiệt độ cao sử dụng tro xỉ nhiệt điện và bột ngói đất sét nung chưa được công bố. Bài báo giới thiệu thành phần tối ưu của bê tông từ cốt liệu tro xỉ nhiệt điện, chất kết dính từ PC, tro bay, bột ngói đất sét nung có thể làm việc đến $800^\circ C$ và một số tính chất cơ lý của bê tông này.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Ở các nhà máy nhiệt điện, tro và xỉ có thể được thải chung đồng thời bằng một phương tiện vận chuyển và chứa ở bãi chứa dưới dạng hỗn hợp tro xỉ, hoặc thải riêng và chứa tro, xỉ riêng biệt. Người ta thường quan niệm tro gồm những cỡ hạt có kích thước nhỏ hơn $0,14\text{ mm}$ và xỉ lớn hơn $0,14\text{ mm}$ [17]. Cốt liệu sử dụng cho bê tông trong nghiên cứu là thải phẩm thu được ở bãi thải của nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân 2 (Bình Thuận), bao gồm các cỡ hạt liên tục từ nhỏ hơn $0,14\text{ mm}$ đến 20 mm , gọi chung là tro xỉ (CA). Chất kết dính chế tạo bê tông từ xi măng PC40 Sông Gianh (Quảng Bình), tro bay (FA) của nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân 2 (Bình Thuận) và bột ngói đất sét nung (FGT) từ ngói vỡ của nhà máy gạch Đại Hưng (Quảng Nam). Thành phần hóa của vật liệu được thể hiện trong Bảng 1.

Xi măng có các tính chất cơ lý được thể hiện trong Bảng 2 thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682:2009 [22]. FA có chỉ số độ hoạt tính là 89,8%, thuộc loại F theo TCVN 10302:2014 [23]. FGT được gia công từ ngói vỡ đất sét nung đến cỡ hạt nhỏ hơn $0,09\text{ mm}$. Một số tính chất vật lý của FA, FGT và CA thể hiện trong Bảng 3.

Khi phân loại các cỡ hạt CA theo TCVN 7572:2006 [21], hàm lượng cỡ hạt lớn hơn 5 mm tương đối thấp (2,9%) nên các tác giả gia công đập tạo cỡ hạt có kích thước nhỏ hơn 5 mm . Hạt cốt liệu có

Bảng 1. Thành phần hóa của các vật liệu

STT	Vật liệu	Hàm lượng các loại ôxyt, %								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MKN
1	PC	21,09	6,53	3,43	64,21	0,85	0,15	2,91	-	0,83
2	FA	55,20	20,97	6,27	0,95	1,54	0,13	3,39	0,54	11,00
3	FGT	63,03	18,72	11,03	1,80	1,34	0,99	0,89	1,13	1,07
4	CA	57,85	22,64	5,59	3,57	1,69	0,13	3,80	0,78	3,96

trong đó: MKN là hàm lượng mất khi nung.

Bảng 2. Tính chất của xi măng

STT	Tính chất		Đơn vị	Phương pháp thử	Kết quả
1	Cường độ uốn:	3 ngày 28 ngày	MPa	TCVN 6016:2011 [18]	5,9 7,5
2	Cường độ nén:	3 ngày 28 ngày	MPa	TCVN 6016:2011 [18]	32,4 51,9
3	Lượng nước tiêu chuẩn		%	TCVN 6017:2015 [19]	32,0
4	Thời gian đông kết	Bắt đầu Kết thúc	phút	TCVN 6017:2015 [19]	110 150
5	Độ ổn định thể tích		mm	TCVN 6017:2015 [19]	0,2
6	Độ mịn (sốt sàng 0,09 mm)		%	TCVN 4030:2003 [20]	0,97
7	Khối lượng riêng		g/cm ³	TCVN 4030:2003 [20]	3,11
8	Khối lượng thể tích xốp		kg/m ³	TCVN 7572:2006 [21]	973,2

Bảng 3. Một số tính chất của phụ gia khoáng và cốt liệu

STT	Tính chất	Đơn vị	Phương pháp thử	FA	FGT	CA
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	TCVN 4030:2003 [20]	2,19	2,68	2,07
2	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	TCVN 7572:2006 [21]	982,1	918,4	787,4
3	Độ ẩm	%	TCVN 7572:2006 [21]	0,4	0,1	1,5

Bảng 4. Một số tính chất của hỗn hợp hạt cốt liệu CA

STT	Tính chất	Đơn vị	Cỡ hạt, mm						
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	
1	Thành phần hạt, a_i A_i	%	9,3	8,6	7,9	15,0	36,0	23,1	
			9,3	18,0	25,9	40,9	76,9	100	
2	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	534,9	512,9	486,2	607,3	682,6	815,4	
3	Độ hút nước	%	12,4	13,0	13,6	9,6	8,9	7,2	

trong đó, a_i là lượng sót riêng biệt (%), A_i là lượng sót tích lũy (%).

kích thước lớn thì sự dẫn nở nhiệt lớn, gây nội ứng suất trong cấu trúc bê tông, sẽ dẫn đến giảm độ bền nhiệt. Hỗn hợp hạt cốt liệu CA có thành phần hạt, khối lượng thể tích xấp xỉ và độ hút nước được xác định theo TCVN 7572:2006 [21], kết quả thể hiện trong Bảng 4.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

a. Thành phần hạt cốt liệu

Thành phần hạt của cốt liệu được xác định dựa trên công thức tính toán của Andersen và áp dụng chế độ làm chặt 0s, 30s, 60s, 90s và 120s. Trong đó, d_i là cỡ hạt thứ i , D là đường kính hạt lớn nhất của cốt liệu (5 mm), n là chỉ số mức xác định bằng thực nghiệm đối với từng loại hỗn hợp hạt và điều kiện sắp xếp ($n = 0,33 \div 0,50$), Y_i là hàm lượng cỡ hạt nhỏ hơn cỡ hạt đi cho trước (%).

$$Y_i = \left(\frac{d_i}{D} \right)^n \cdot 100\% \quad (1)$$

Độ rỗng thực tế của hỗn hợp hạt được xác định theo phương pháp thể tích nước tuyệt đối. Phương pháp này dựa trên cơ sở lượng nước đưa vào hỗn hợp cốt liệu đến khi hỗn hợp cốt liệu hút nước đến bão hòa, qua đó xác định được độ rỗng giữa hạt và độ rỗng hở [24, 25]. Theo phương pháp này, hỗn hợp hạt sau khi tính toán theo công thức (1), làm chặt trên bàn rung theo các thời gian 30s, 60s, 90s và 120s. Cho hỗn hợp hạt ngấm nước đến bão hòa với thời gian 48h, xác định khối lượng vật liệu bão hòa nước (G_{bh}). Đổ lượng nước dư ra khỏi hỗn hợp vật liệu xác định khối lượng vật liệu ẩm (G_a). Để vật liệu đến trạng thái se bề mặt, xác định khối lượng (G_s). Sấy vật liệu xác định khối lượng (G_k). Lượng nước giữa các hạt (G_1) tính theo: $G_1 = G_{bh} - G_a$, lượng nước bao bọc hạt (G_2) tính theo: $G_2 = G_a - G_s$, lượng nước hấp phụ vào trong hạt cốt liệu (G_3) tính theo: $G_3 = G_s - G_k$. Quy ước G_3 là tổng lượng nước trong lỗ rỗng hở của hạt cốt liệu (V_1), G_1 và G_2 là tổng lượng nước giữa các hạt cốt liệu (V_2). V là thể tích của hỗn hợp hạt. Độ rỗng hở trong hạt (r_h , %) và độ rỗng giữa hạt (r_{gh} , %) được tính toán theo các công thức (2) và (3).

$$r_h = \frac{V_1}{V} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$r_{gh} = \frac{V_2}{V} \cdot 100\% \quad (3)$$

b. Thành phần chất kết dính

Thành phần chất kết dính của bê tông được xác định dựa trên cường độ nén tốt nhất của mẫu kích thước $20 \times 20 \times 20$ mm. Các tỷ lệ FA và FGT thay thế PC được nghiên cứu khác nhau với tổng tỷ lệ thay thế từ $20 \div 50\%$ theo khối lượng của chất kết dính, thể hiện trong Bảng 5. Nước nhào trộn là lượng nước tiêu chuẩn của hỗn hợp chất kết dính (N_{tc} , %) được xác định theo TCVN 6017:2015 [19].

Sau khi định lượng hỗn hợp chất kết dính, tiến hành nhào trộn và đúc mẫu. Mẫu được duy trì trong điều kiện 27 ± 2 °C, độ ẩm không nhỏ hơn 95% trong 20h và chưng hấp (nhiệt độ 100 °C với thời gian 4h kể từ khi sôi) nhằm đẩy nhanh quá trình dưỡng hộ. Sau đó sấy khô mẫu ở 100 °C trong 24h rồi đưa mẫu vào lò điện nung ở 200, 400, 600 và 800 °C với tốc độ nâng nhiệt không quá 5 °C/ph, thời gian hằng nhiệt là 2h. Tiếp theo, mẫu được làm nguội trong không khí đến nhiệt độ phòng và xác định cường độ nén [14, 26]. Giá trị cường độ nén ở các cấp nhiệt độ (R'_n , MPa) tính theo công thức (4). Trong đó: P là tải trọng nén (kN), F là diện tích chịu nén (cm^2).

$$R'_n = \frac{P}{F}, \text{ MPa} \quad (4)$$

Bảng 5. Thành phần hỗn hợp chất kết dính

Mẫu	PC, %	FA, %	FGT, %	N_{tc} , %
PC	100	0	0	32,0
F10T10	80	10	10	30,5
F20T10	70	20	10	30,3
F30T10	60	30	10	30,0
F40T10	50	40	10	29,5
F10T20	70	10	20	32,0
F10T30	60	10	30	33,5
F10T40	50	10	40	34,0

Cường độ nén của mẫu còn được đánh giá qua giá trị cường độ nén còn lại so với ở 100 °C (R_{ncl} , %) hay giá trị mất cường độ nén so với ở 100 °C (R_{nm} , %), thể hiện lần lượt ở công thức (5) và (6). Trong đó, R_n^t là cường độ nén của mẫu ở các cấp nhiệt độ, R_n^{100} là cường độ nén của mẫu ở 100 °C.

$$R_{ncl} = \frac{R_n^t}{R_n^{100}} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$R_{nm} = \left(1 - \frac{R_n^t}{R_n^{100}}\right) \cdot 100\% \quad (6)$$

c. Thành phần bê tông

Thành phần bê tông xác định theo phương pháp tính toán kết hợp thực nghiệm. Cấp phối sơ bộ được tính toán theo công thức của PP. Melnhicop [7]. Mẫu được đúc trong khuôn có kích thước 70,7×70,7×70,7 mm. Sau khi dưỡng hộ 24h trong khuôn với độ ẩm $\geq 95\%$, nhiệt độ 27 ± 2 °C, mẫu được ngâm trong nước 6 ngày với nhiệt độ 27 ± 2 °C [27]. Sau đó, mẫu được đưa đi sấy ở 100 °C trong 24h rồi đưa mẫu vào lò điện nung ở 800 °C với tốc độ nâng nhiệt không quá 5 °C/ph và thời gian hằng nhiệt là 2h. Tiếp theo, mẫu được làm nguội trong không khí đến nhiệt độ phòng và xác định các tính chất cơ lý như khối lượng thể tích, độ co ngót và cường độ nén.

Để xác định giá trị khối lượng thể tích của bê tông, sử dụng phương pháp cân và đo. Giá trị khối lượng thể tích của mẫu (γ_o , kg/m³) được xác định theo công thức (7). Trong đó, G là khối lượng của mẫu ở các cấp nhiệt độ (g); V là thể tích của mẫu ở các cấp nhiệt độ (cm³).

$$\gamma_o = \frac{G}{V}, \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

Độ co ngót của bê tông xác định bằng phương pháp đo. Thể tích mẫu tính bằng giá trị trung bình của 3 lần đo kích thước tương ứng 3 vị trí theo 3 phương của mẫu. Giá trị độ co thể tích của mẫu (C_v , %) được xác định theo công thức (6). Trong đó, V_o là thể tích của mẫu ở 100 °C (cm³); V_1 là thể tích của mẫu sau khi nung (cm³). Độ co dài của mẫu (C_l , %) được xác định theo công thức (9) [28].

$$C_v = \frac{V_o - V_1}{V_o} \cdot 100\% \quad (8)$$

$$C_l = \left[1 - \left(1 - \frac{C_v}{100}\right)^{1/3}\right] \cdot 100\% \quad (9)$$

Tối ưu hóa thành phần của bê tông theo phương pháp quy hoạch bậc 2 tâm xoay của Box và Hunter [29]. Hàm mục tiêu nghiên cứu là các tính chất cơ lý của bê tông và các yếu tố ảnh hưởng là thành phần hạt cốt liệu (thông qua giá trị tính toán n của công thức Andersen) và tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD).

3. Kết quả và thảo luận

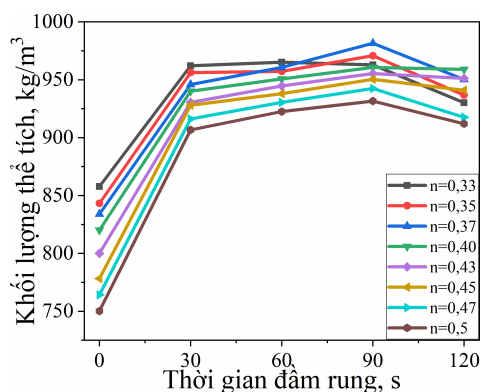
3.1. Thành phần hạt cốt liệu

Kết quả khối lượng thể tích của các hỗn hợp hạt tính toán theo công thức Andersen ($n = 0,33 \div 0,5$) tương ứng với các chế độ làm chặt khác nhau (đầm rung 0s, 30s, 60s, 90s, 120s) được giới thiệu trong Hình 1. Ở trạng thái đổ đồng (không đầm rung – 0s), khi chỉ số n tăng từ $0,33 \div 0,50$ thì khối lượng thể tích của hỗn hợp hạt cốt liệu giảm và độ rỗng tăng lên do hàm lượng hạt lớn tăng, hàm lượng hạt nhỏ giảm mà bản thân những hạt lớn có cấu trúc rỗng xốp, khối lượng thể tích nhỏ, ngoài ra hạt nhỏ quá ít sẽ không đủ để lấp đầy khoảng trống giữa các hạt lớn. Khi áp dụng chế độ làm chặt thì giá trị khối lượng thể tích của hỗn hợp hạt cốt liệu tăng lên. Khi tăng thời gian đầm rung từ 0s đến 90s, giá trị khối lượng thể tích của hỗn hợp hạt tăng dần và nếu tăng thời gian đầm > 90s thì giá trị khối lượng thể tích của hỗn hợp hạt có xu hướng giảm do sau khi đạt được mức độ lèn chặt, rung động sẽ làm hỗn hợp hạt lỏng lẻo.

Để tìm mối quan hệ thống kê giữa giữa khối lượng thể tích của hỗn hợp hạt và thành phần hạt để dự đoán khối lượng thể tích của hỗn hợp hạt khi đầm rung 90s cũng như tìm thành phần hạt hợp lý, phân tích hồi quy tuyến tính với biến phụ thuộc là khối lượng thể tích và một biến độc lập là thành phần hạt thông qua chỉ số n được áp dụng. Sử dụng công cụ là phần mềm Matlab 2016 và phân tích phương sai đánh giá độ tin cậy của mô hình. Lựa chọn mô hình hồi quy có dạng: $y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ với x là chỉ số mức n . Phương trình tương quan tương quan khối lượng thể tích của hỗn hợp cốt liệu thể hiện ở phương trình (10).

$$y = 737,45 + 1317,7x - 1869,9x^2 \quad (10)$$

Phân tích phương sai ($F = 42,6$, $p = 4,04e^{-8} < 0,05$). Mức độ dự đoán biến phụ thuộc mô hình tốt, trên 80% ($R^2 = 0,802$). Giải phương trình hồi quy, hỗn hợp cốt liệu cho giá trị khối lượng thể tích lớn nhất là $969,6 \text{ kg/m}^3$ tại $n = 0,352$ tương ứng cỡ hạt $1,25 \div 2,5$ là 21,7%, $0,63 \div 1,25 \text{ mm}$ là 13,2%, $0,315 \div 0,63 \text{ mm}$ là 10,4%, $0,14 \div 0,315 \text{ mm}$ là 9,4% và nhỏ hơn $0,14 \text{ mm}$ là 28,4%. Trong khi đó, công bố của Phượng về thành phần hạt cốt liệu cho bê tông chịu nhiệt cho rằng, $n = 0,43$ tương ứng chế độ đầm chặt 60s cho khối lượng thể tích hỗn hợp hạt cốt liệu là $1706,5 \text{ kg/m}^3$ với tro xỉ Cẩm Phả (Quảng Ninh) [24], $n = 0,387$ tương ứng chế độ đầm chặt 90s cho khối lượng thể tích hỗn hợp hạt cốt liệu là $1313,2 \text{ kg/m}^3$ với tro xỉ Duyên Hải (Trà Vinh) [25]. Cốt liệu tro xỉ trong nghiên cứu có tính năng nhẹ cũng như độ rỗng lớn, hạt càng thô thì độ rỗng trong hạt lớn dẫn đến khối lượng thể tích hạt và hỗn hợp hạt càng nhỏ so với các loại tro xỉ Cẩm Phả, Duyên Hải nên chỉ số n nhỏ hơn sẽ đạt được mức độ tối ưu về thành phần hạt. Thực nghiệm nhằm kiểm tra kết quả lý thuyết cho thấy các giá trị sau khác

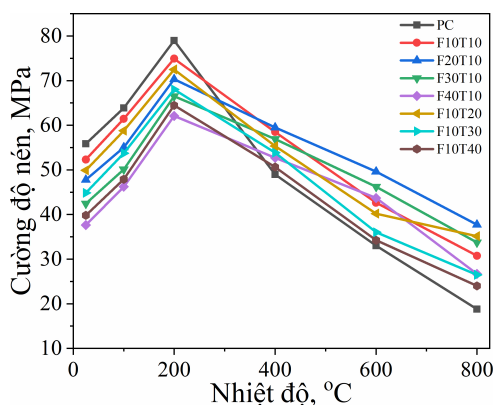


Hình 1. Khối lượng thể tích của hỗn hợp hạt cốt liệu CA tương ứng với các chế độ làm chặt

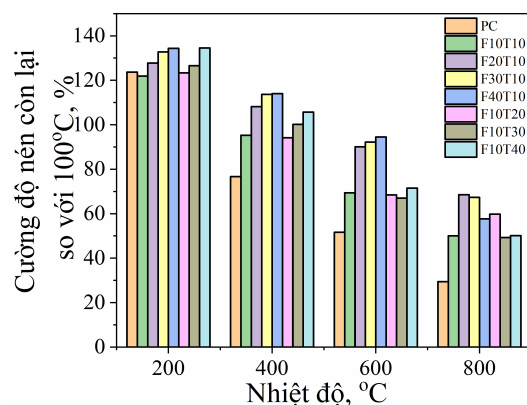
nhau không nhiều. Hỗn hợp cốt liệu có khối lượng thể tích $983,8 \text{ kg/m}^3$. Sử dụng phương pháp thể tích nước tuyệt đối, độ rỗng giữa hạt thực tế của hỗn hợp hạt là 44,4%, độ rỗng hở thực tế 5,8%. Độ rỗng giữa hạt cốt liệu được xác định cho phép tính toán được lượng vữa bao bọc cũng như lèn giữa các hạt cốt liệu. Đây là thông số để tính toán thành phần bê tông.

3.2. Thành phần chất kết dính

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ đến cường độ nén của các mẫu chất kết dính thể hiện trong Hình 2 và Hình 3.



Hình 2. Cường độ nén của mẫu ở các cấp nhiệt độ



Hình 3. Cường độ nén còn lại của mẫu ở các cấp nhiệt độ so với ở 100 °C

Ở nhiệt độ thường, hàm lượng phụ gia khoáng thay thế xi măng càng lớn thì cường độ nén của mẫu giảm so với mẫu đối chứng PC. Điều này có thể giải thích, khi cho phụ gia bột ngói vào nước thì hầu hết các thành phần của nó không bị thủy hóa nên sẽ làm giảm hoạt tính của mẫu. Sấy và đốt nóng mẫu đến $100 \div 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ thì cường độ của mẫu tăng dần. Ở khoảng nhiệt độ này xảy ra sự mất nước tự do, nước vật lý [2] làm đá xi măng co lại làm tăng độ chặt, đồng thời nước tự do tách ra thúc đẩy quá trình thủy hóa của PC làm tăng cường độ, lúc này giá trị cường độ nén mẫu PC ở $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ đạt 123,7% so với giá trị cường độ nén ở $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, với các mẫu chất kết dính sử dụng FA và FGT thì giá trị cường độ nén còn lại là 121,9÷134,6% (Hình 3).

Từ $200 \div 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mẫu PC có sự suy giảm cường độ mạnh do sự tách nước vật lý và nước hóa học [2], cường độ nén còn lại 77,7%. Các mẫu chứa FA và FGT thì sự tăng hay giảm cường độ nén phụ thuộc vào loại và hàm lượng phụ gia. Mẫu F40T10 có cường độ tăng cao nhất 114% trong khi mẫu F10T20 thì cường độ mất 5,8%. Nguyên nhân của sự tăng cường độ trong giai đoạn này là trong mẫu này có các khoáng mới sinh ra do phản ứng giữa các thành phần của phụ gia khoáng và $\text{Ca}(\text{OH})_2$ có trong đá xi măng [30]. Từ $400 \div 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, cường độ nén của các mẫu tiếp tục suy giảm. Cường độ mẫu PC còn lại 51,6%, mẫu F40T10 có sự mất cường độ nhỏ nhất, cường độ còn lại là 94,5%. Trong giai đoạn này, sự phân hủy $\text{Ca}(\text{OH})_2$ thành CaO tự do và xảy ra phản ứng khi gặp hơi ẩm trong không khí là nguyên nhân gây ra các vết nứt tế vi, làm tăng thể tích mẫu, làm cường độ mẫu giảm mạnh [12]. Từ $600 \div 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sự phân hủy C-S-H hình thành $\beta\text{C}_2\text{S}$ và phân hủy CaCO_3 [2, 14] làm giá trị khối lượng mẫu giảm và co ngót tăng, cường độ nén của mẫu PC còn lại 29,4%, từ 49,3÷68,5 với các mẫu chứa FA và FGT. Ở khoảng nhiệt độ này, mẫu F20T10 có cường độ nén cao nhất là 37,7 MPa (Hình 2), còn lại 68,5% so với cường độ nén ở $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Để tìm mối quan hệ thống kê giữa giữa cường độ nén của đá chất kết dính và hàm lượng phụ gia khoáng để dự đoán cường độ nén ở $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ cũng như tìm hàm lượng phụ gia khoáng hợp lý, phân tích

hồi quy tuyến tính đơn giản với biến phụ thuộc là cường độ nén và một biến độc lập là hàm lượng phụ gia khoáng được áp dụng. Lựa chọn mô hình hồi quy có dạng: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_1x_1^2 + b_2x_2^2$ với x_1 là hàm lượng FA, x_2 là hàm lượng FGT. Phân tích ý nghĩa của phương trình tương quan nhận thấy ảnh hưởng của hệ số x_1x_2 khá nhỏ nên định dạng lại. Phương trình tương quan tương quan cường độ nén của đá chất kết dính thể hiện ở phương trình (11).

$$y = 18,7002 + 1,15574x_1 + 0,2984x_2 - 0,0354x_1^2 - 0,0121x_2^2 \quad (11)$$

Phân tích phương sai ($F = 165$, $p = 7,08e^{-26} < 0,05$). Mức độ dự đoán biến phụ thuộc mô hình tốt, trên 90% ($R^2 = 0,937$). Giải phương trình tương quan, hàm lượng phụ gia khoáng là FA = 22%, FGT = 12,3% cho cường độ nén cao nhất ở 800 °C là 37,7 MPa. Kiểm tra lại bằng thực nghiệm, mẫu chứa hàm lượng phụ gia khoáng trên có cường độ nén 39,7 MPa tại khoảng nhiệt độ 800 °C, không sai khác nhiều so với kết quả tính toán lý thuyết. Bên cạnh đó, tác giả Hamdy El-Didamony [31] cho rằng, mẫu chất kết dính chứa 5% bột gạch và 15% FA thì cho cường độ nén ở 800 °C cao hơn các tỷ lệ còn lại, nhưng nhỏ hơn mẫu chứa 20% FA.

3.3. Thành phần bê tông

a. Tính toán cấp phối bê tông

Nhiệm vụ thiết kế là cường độ bê tông đạt 20 MPa ở tuổi 7 ngày (sau sấy ở 100 °C), độ sụt của hỗn hợp bê tông là 1÷2 cm (tương ứng độ cứng 25÷35s). Lựa chọn thành phần bê tông với tỷ lệ FA/FGT/PC là 22/12,3/65,7 có $N_{tc} = 30,5\%$, thành phần hạt với $n = 0,352$ có khối lượng thể tích đầm chặt thực nghiệm là 983,8 kg/m³, độ rỗng thực tế giữa hạt là 44,4%. Cấp phối sơ bộ của bê tông được tính toán theo công thức của Melnhicop [7].

Bảng 6. Cấp phối của bê tông

Cấp phối	CA, kg	PC, kg	FA, kg	FGT, kg	N, lít	PGSD, lít
Sơ bộ	885,6	417,0	139,9	78,3	348,5	-
Hiệu chỉnh	1024,9	363,8	122,1	68,3	304,8	5,5

trong đó, N là nước, PGSD là phụ gia siêu dẻo.

Cấp phối tính toán sơ bộ cho hỗn hợp bê tông có độ cứng cao. Điều chỉnh tính công tác bằng cách sử dụng phụ gia siêu dẻo ADVA® CAST 5388V. Bê tông có cường độ nén ở 100 °C khoảng 35÷41 MPa. Lượng dùng chất kết dính lớn nên các tác giả tiến hành điều chỉnh thành phần bê tông sao cho tiết kiệm lượng dùng xi măng, giảm độ co ngót, tăng độ bền nhiệt của sản phẩm cũng như đảm bảo giá thành cho bê tông. Cấp phối sơ bộ và sau khi hiệu chỉnh của bê tông được thể hiện ở Bảng 6.

b. Quy hoạch thực nghiệm

Để tìm cấp phối tối ưu cho bê tông làm việc ở nhiệt độ cao, tiến hành lập phương trình hồi quy theo kế hoạch bậc hai tâm xoay của Box và Hunter [29] kết hợp phần mềm Maple 17.0. Chọn hàm mục tiêu là cường độ nén, khối lượng thể tích và độ co ngót của bê tông ở nhiệt độ 800 °C, yếu tố chính ảnh hưởng đến hàm mục tiêu là N/CKD và thành phần hạt cốt liệu (thể hiện qua chỉ số n). Các kết quả nghiên cứu khảo sát cho thấy $N/CKD = 0,51 \div 0,59$ thì hỗn hợp bê tông có độ cứng khoảng 20÷37s. Chọn tỷ lệ $N/CKD = 0,55$ là tâm quy hoạch, khoảng quy hoạch (ΔZ_j) là 0,02. Lượng dùng PGSD được tính theo lượng dùng chất kết dính. Theo kết quả thực nghiệm, $n = 0,33 \div 0,40$ tương ứng với thời gian làm chặt 90s cho hỗn hợp hạt cốt liệu có độ đặc cao và theo kết quả nghiên cứu lý thuyết

thì $n = 0,352$ cho hỗn hợp hạt có mật độ cao nhất. Tác giả lựa chọn $n = 0,352$ làm tâm quy hoạch và ΔZ_j là 0,02. Sự mã hoá các biến cùng các mức quy hoạch thực nghiệm tính chất của bê tông thể hiện ở Bảng 7. Kế hoạch thực nghiệm các tính chất của bê tông thể hiện ở Bảng 8.

Bảng 7. Bảng mã hóa quy hoạch thực nghiệm tính chất bê tông

Nhân tố	Biến mã hóa	Các mức quy hoạch					ΔZ_j
		1,414	-1	0	1	1,414	
N/CKD (PGSD)	x_1	0,52 (1,42)	0,53 (1,30)	0,55 (1,00)	0,57 (0,70)	0,58 (0,58)	0,02 (0,3)
Chỉ số n	x_2	0,324	0,332	0,352	0,372	0,380	0,02

Bảng 8. Kế hoạch thực nghiệm tính chất của bê tông

STT	Biến mã		Tính chất hỗn hợp bê tông		Tính chất bê tông ở 100 °C		Tính chất bê tông ở 800 °C		
	x_1	x_2	ĐC, s	γ_o , kg/m ³	R_n , MPa	γ_o , kg/m ³	R_n , MPa	γ_o , kg/m ³	C_l , %
1	1	1	28	1794,1	24,0	1455,6	14,0	1415,4	0,40
2	1	-1	27	1793,4	24,5	1445,8	13,5	1409,2	0,42
3	-1	1	37	1819,2	27,8	1497,7	16,4	1441,1	0,27
4	-1	-1	35	1820,0	23,9	1466,5	13,7	1410,5	0,42
5	1,414	0	24	1796,6	24,8	1461,6	14,0	1421,5	0,39
6	-1,414	0	29	1821,3	25,7	1484,8	14,6	1430,5	0,37
7	0	1,414	29	1806,8	23,6	1466,4	13,8	1417,2	0,42
8	0	-1,414	27	1804,9	24,5	1426,3	12,9	1411,8	0,43
9	0	0	30	1814,4	27,4	1454,4	16,1	1445,3	0,25
10	0	0	28	1812,2	26,9	1450,5	15,5	1447,7	0,29
11	0	0	29	1814,0	26,9	1458,9	15,2	1443,9	0,30
12	0	0	31	1818,2	27,9	1467,5	15,8	1447,6	0,28
13	0	0	30	1819,8	27,9	1468,4	16,0	1449,6	0,26

trong đó, ĐC là độ cứng của hỗn hợp bê tông (s); R_n là cường độ nén (MPa); γ_o là khối lượng thể tích (kg/m³); C_l là độ co dài (%).

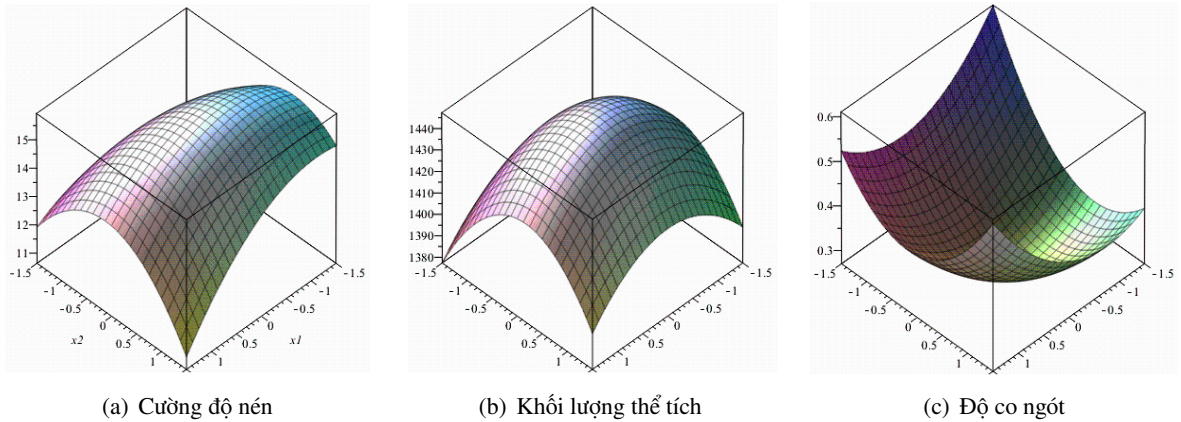
Lựa chọn mô hình hồi quy có dạng: $y = b_o + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_1x_1^2 + b_2x_2^2$. Sử dụng phần mềm Maple 17.0 thiết lập được các phương trình hồi quy các tính chất bê tông ở 800 °C. Kiểm tra ý nghĩa của các hệ số theo chuẩn Student, các phương trình hồi quy (12)–(14) được xác định.

$$y_{R_n} = 15,6939 - 0,405x_1 + 0,5519x_2 - 1,0359x_1x_2 - 0,5582x_1^2 - 1,0359x_2^2 \quad (12)$$

$$y_{\gamma_o} = 1446,82 + 5,5553x_2 - 10,7113x_1^2 - 16,463x_2^2 \quad (13)$$

$$y_C = 0,276 + 0,0198x_1 - 0,023x_2 + 0,0325x_1x_2 + 0,0458x_1^2 + 0,0683x_2^2 \quad (14)$$

Kiểm tra sự tương hợp của các phương trình (12)–(14) theo chuẩn (Fischer) [29]. Giá trị được tính lần lượt là 3,43, 1,12 và 4,63 đều nhỏ hơn giá trị F tra bảng nên các phương trình tương hợp với bức tranh thực nghiệm. Đồ thị biểu diễn các phương trình thể hiện ở Hình 4.



Hình 4. Đồ thị biểu diễn các phương trình hồi quy tính chất của bê tông ở 800 °C

Dựa vào các phương trình hồi quy (12)–(14), x_1 ảnh hưởng theo hàm số đảo đến cường độ và ảnh hưởng theo hàm số thuận với độ co, tức là N/CKD càng tăng thì cường độ nén giảm và độ co tăng lên. Sự ảnh hưởng này giống quy luật của bê tông thường. Trong khi đó, x_2 ảnh hưởng đến hàm mục tiêu nhiều hơn, thành phần hạt với chỉ số n lớn sẽ cho mẫu bê tông có cường độ và khối lượng thể tích cao hơn, độ co nhỏ. Lúc này, thành phần hạt hợp lý không phải giá trị lựa chọn ở tâm quy hoạch. Chỉ số n tăng, độ rỗng giữa hạt của hỗn hợp cốt liệu tăng lên. Tuy nhiên, hỗn hợp hạt có giá trị độ rỗng giữa hạt lớn đôi khi sẽ tăng độ bền nhiệt cũng như cường độ của bê tông do những ứng suất nhiệt phát sinh sẽ “tắt” ở những bề mặt phân chia pha. Sự sắp xếp của các hạt sẽ tạo ra các kẽ nứt tế vi làm tăng biên độ dao động của các hạt khi đốt nóng và làm nguội sản phẩm.

Bảng 9. Kết quả tính toán theo lý thuyết về thành phần và tính chất của bê tông

CP	Tỷ lệ vật liệu			Tính chất bê tông ở 800 °C		
	N/CKD	n	PGSD	R_n , MPa	γ_o , kg/m ³	C, %
1	0,54	0,358	1,18	15,9	-	-
2	0,55	0,353	1,00	-	1447,3	-
3	0,54	0,355	1,09	-	-	0,27

trong đó, “-” là không xác định.

Bảng 10. Kết quả thực nghiệm về tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông

CP	Tính chất hỗn hợp bê tông		Tính chất bê tông ở 100 °C		Tính chất bê tông ở 800 °C		
	ĐC, s	γ_o , kg/m ³	R_n , MPa	γ_o , kg/m ³	R_n , MPa	γ_o , kg/m ³	C, %
1	28	1820,3	27,5	1463,2	15,0	1447,5	0,27
2	30	1822,5	27,4	1468,2	14,9	1449,0	0,27
3	31	1832,6	27,3	1478,6	16,5	1448,9	0,29

Giải các phương trình hồi quy, tỷ lệ vật liệu thành phần bê tông được thể hiện trong Bảng 9. Kết quả thực nghiệm tính chất cơ lý của bê tông ở 800 °C không sai khác nhiều so với kết quả tính toán lý thuyết theo phương trình hồi quy, thể hiện ở Bảng 10.

Dựa trên kết quả kiểm tra tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông, lựa chọn thành phần vật liệu tối ưu cho bê tông là cấp phối 1. Ở 800 °C, bê tông lúc này có cường độ nén là 15,0 MPa, còn lại trên 50% so với cường độ nén ở 100 °C nên bê tông đảm bảo yêu cầu về khả năng chịu lực. Độ co ngót của bê tông khi nung khá nhỏ là 0,27%. Sự mất khối lượng của bê tông thấp, giá trị khối lượng thể tích của bê tông là 1447,5 kg/m³, còn lại trên 90% so với giá trị ở 100 °C. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu về bê tông thường, cường độ nén chỉ còn lại khoảng 10÷20% ở khoảng nhiệt độ này [3, 4]. Chứng tỏ việc sử dụng tro xỉ nhiệt điện và bột ngói đất sét nung đã cải thiện cường độ nén của bê tông ở nhiệt độ cao. Kết quả nghiên cứu của tác giả Demirel [16] cho thấy bê tông sử dụng đá bột và silica fume có giá trị cường độ suy giảm mạnh ở khoảng 800 °C, chỉ còn lại khoảng 22,1÷24,6% so với ở nhiệt độ thường.

4. Kết luận

Một số kết luận sau đây được rút ra dựa trên kết quả thực nghiệm được trình bày trong bài báo này.

- Thành phần hạt cốt liệu từ CA cho bê tông làm việc ở nhiệt độ cao được thiết kế đơn giản dựa vào công thức tính toán Andersen kết hợp với các chế độ đầm rung 0s, 30s, 60s, 90s và 120s để tìm mật độ cao nhất.

- Các phụ gia khoáng mịn như FA, FGT có thể cải thiện cường độ nén của đá chất kết dính. Từ 200÷800 °C, mẫu F20T10 có giá trị cường độ nén cao nhất, gấp 1,2÷2 lần so với mẫu PC.

- Phương trình tương quan giữa khối lượng thể tích hỗn hợp hạt và thành phần hạt, cường độ nén chất kết dính ở 800 °C và hàm lượng phụ gia khoáng được thiết lập, mức độ dự đoán biến phụ thuộc mô hình tốt. Thông qua các phương trình này, thành phần hạt với $n = 0,352$ cho khối lượng thể tích hỗn hợp hạt cao nhất, chất kết dính với thành phần hợp lý FA = 22%, FGT = 12,3% có thể làm việc đến 800 °C.

- Bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm tìm được thành phần tối ưu chế tạo bê tông có thể làm việc đến 800 °C với $n = 0,358$, CA 1020,8 kg, PC 368,6 kg, FA 123,7 kg, FGT 69,2 kg, N 303,3 l và PGSD 6,6 l. Bê tông có cường độ nén còn lại trên 50%, khối lượng thể tích còn lại trên 90% so với giá trị ở 100 °C và độ co ngót nhỏ hơn 1%.

- Mức độ ảnh hưởng của thành phần hạt cốt liệu từ tro xỉ nhiệt điện đến một số tính chất cơ lý của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao lớn hơn so với yếu tố N/CKD.

Tài liệu tham khảo

- [1] Krishna, D. A., Priyadarsini, R. S., Narayanan, S. (2019). [Effect of Elevated Temperatures on the Mechanical Properties of Concrete](#). *Structural Integrity*, 14:384–394.
- [2] Hager, I. (2013). [Behaviour of cement concrete at high temperature](#). *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61(1):145–154.
- [3] Schneider, U. (1988). [Concrete at high temperatures — A general review](#). *Fire Safety Journal*, 13(1): 55–68.
- [4] Xiao, J., König, G. (2004). [Study on concrete at high temperature in China—an overview](#). *Fire Safety Journal*, 39(1):89–103.
- [5] Budnikov, P. P., Savel'yev, V. G. (1962). [Refractory concretes with a barium aluminate binder](#). *Refractories*, 3(9-10):314–317.
- [6] Hager, I., Tracz, T., Śliwiński, J., Krzemień, K. (2015). [The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature](#). *Fire and Materials*, 40(5):668–682.

- [7] Nekrasov, K. D., Tarasova, A. P. (1969). *Heat-resistant concrete using Portland cement*. Construction Publisher, Moscow (in Russian).
- [8] Netinger, I., Kesegic, I., Guljas, I. (2011). [The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates](#). *Fire Safety Journal*, 46(7):425–430.
- [9] Aydın, S. (2008). [Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice](#). *Fire Safety Journal*, 43(8):610–617.
- [10] Anghelescu, L., Cruceru, M., Diaconu, B. (2017). Bottom ash as granular aggregate to manufacturing of lightweight heat resistant concretes. *International Journal of Energy and Environment*, 11:168–171.
- [11] Yüksel, I., Siddique, R., Özkan, O. (2011). [Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement](#). *Construction and Building Materials*, 25(2):967–972.
- [12] Remnev, V. V. (1996). [Heat-resistant properties of cement stone with finely milled refractory additives](#). *Refractories and Industrial Ceramics*, 37(5):151–152.
- [13] Heikal, M., El-Didamony, H., Sokkary, T. M., Ahmed, I. A. (2013). [Behavior of composite cement pastes containing microsilica and fly ash at elevated temperature](#). *Construction and Building Materials*, 38: 1180–1190.
- [14] Heikal, M. (2008). Effect of elevated temperature on the physico-mechanical and microstructural properties of blended cement pastes. *Building Research Journal*, 56(2):157–172.
- [15] Aydın, S., Baradan, B. (2007). [Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars](#). *Cement and Concrete Research*, 37(6):988–995.
- [16] Demirel, B., Keleştemur, O. (2010). [Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume](#). *Fire Safety Journal*, 45(6-8):385–391.
- [17] Tung, T. H. (2017). *Phát triển bền vững vật liệu xây dựng trong điều kiện biến đổi khí hậu Việt Nam. Phần 2. Bài giảng môn học Sau đại học*. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [18] TCVN 6016:2011. *Xi măng - Phương pháp thử-Xác định cường độ*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [19] TCVN 6017:2015. *Xi măng - Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [20] TCVN 4030:2003. *Xi măng - Phương pháp xác định độ mịn*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [21] TCVN 7572:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [22] TCVN 2682:2009. *Xi măng poóc lăng - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [23] TCVN 10302:2014. *Phụ gia khoáng hoạt tính - Tro bay cho bê tông, vữa và xi măng*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [24] Phượng, Đ. T., Trí, L. V., Đức, V. M. (2019). [Tối ưu hóa thành phần hạt tro xỉ nhiệt điện sử dụng làm cốt liệu cho bê tông chịu nhiệt](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(5V): 124–132.
- [25] Do, T. P., Lam, N., Vu, M. D. (2020). [Study on particle size distribution of aggregate from coal ash for heat-resistant concrete](#). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869:032044.
- [26] Do, T. P., Nguyen, V. Q., Vu, M. D. (2020). A Study on Property Improvement of Cement Pastes Containing Fly Ash and Silica Fume After Treated at High Temperature. *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development. GTSD 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer International Publishing, 532–542.
- [27] GOST 20910-2019 (2019). *Heat-resistan concrete*. Technical requirements Moscow. (in Russian).
- [28] ASTM C21 - C326-09 (2018). [Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays](#).
- [29] Tuyen, N. M. (2005). *Quy hoạch thực nghiệm*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [30] Tanyildizi, H., Coskun, A. (2008). [The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash](#). *Construction and Building Materials*, 22(11):2269–2275.
- [31] El-Didamony, H., El-Rahman, E. A., Osman, R. M. (2012). [Fire resistance of fired clay bricks-fly ash composite cement pastes](#). *Ceramics International*, 38(1):201–209.