

# Ảnh hưởng của thành phần vật liệu và điều kiện thí nghiệm đến cường độ chịu nén của bê tông sử dụng tro xỉ nhiệt điện ở nhiệt độ cao

Đỗ Thị Phương<sup>1\*</sup>, Nguyễn Nhân Hoà<sup>2</sup>, Vũ Minh Đức<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Khoa Xây dựng Cầu đường, trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

<sup>2,3</sup> Khoa Vật liệu xây dựng, trường Đại học Xây dựng Hà Nội

**TỪ KHOA**

Bê tông  
Tro xỉ nhiệt điện  
Cường độ chịu nén  
Chế độ làm nguội mẫu  
Nhiệt độ

**TÓM TẮT**

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của thành phần vật liệu đến cường độ chịu nén của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao sử dụng cốt liệu tro xỉ nhiệt điện có cỡ hạt đến 5 mm, chất kết dính từ xi măng poóclăng cùng 15 % tro bay và 5 % silica fume. Mẫu bê tông sau khi chế tạo và dưỡng hộ, được nung ở các cấp nhiệt độ 200, 400, 600 và 800 °C, hằng nhiệt hai giờ. Cường độ chịu nén theo các cấp nhiệt độ được xác định tương ứng hai cách làm nguội mẫu. Kết quả chỉ ra thành phần vật liệu tốt nhất của bê tông khi làm việc ở 800 °C là tỷ lệ nước/chất kết dính là 0,61 và thành phần hạt tính toán theo công thức Andersen với chỉ số mức n là 0,357; khi đó cường độ chịu nén của bê tông còn lại trên 56 %. Làm nguội mẫu chậm trong không khí cho cường độ chịu nén theo nhiệt độ cao hơn làm nguội mẫu nhanh trong nước nhưng mức độ chênh lệch không nhiều, khoảng 3 ÷ 9 %.

**KEYWORDS**

Concrete  
Coal ash  
Compressive strength  
Cooling method  
Temperature

**ABSTRACT**

This study investigated the effects of mixture proportion on compressive strength of concrete specimens at elevated temperature obtained by substituting Portland cement with 15 % fly ash, 5 % silica fume and coal ash as aggregates with particle size up to 5 mm. After casting and curing period, the specimens were exposed to various temperatures (200, 400, 600 and 800 °C) for tow hours. The compressive strength according to temperature level was determined, corresponding to tow cooling methods. The results demonstrated that water-binder ratio of 0.61 and aggregate particle size distribution was calculated using the Andersen's formula with the calculated value of n = 0.357, the strength of concrete was the highest at a temperature of 800 °C, residual compressive strength above 56 %. Rapid cooling in water caused additional compressive strength losses compared with slow cooling in air at all test temperature, but the difference was not much, about 3 ÷ 9 %.

**1. Giới thiệu**

Ở một số nước, chất lượng của kết cấu bê tông khi hoả hoạn hay ở nhiệt độ cao được xem xét rõ ràng trong thiết kế và các yêu cầu kỹ thuật đã được phát triển để thể hiện mối quan hệ giữa nhiệt độ và các tính chất cơ học của bê tông, đặc biệt là cường độ chịu nén. Cường độ chịu nén của bê tông biến động theo quy luật biến đổi của chất kết dính dưới tác dụng của nhiệt độ. Với bê tông sử dụng xi măng poóclăng (PC), thông thường khi bắt đầu gia nhiệt thì cường độ của mẫu sẽ tăng, ở nhiệt độ nhỏ hơn 300 °C cường độ nén của bê tông có thể đạt mức 100 % so với cường độ ở nhiệt độ thường. Ở khoảng 400 ÷ 600 °C, cường độ bê tông giảm mạnh. Trên 700 ÷ 800 °C, cường độ lúc này chỉ còn khoảng 10 % so với cường độ ban đầu [1].

Theo quan điểm toàn cầu về sự phát triển bền vững trong công nghiệp vật liệu xây dựng, đó là sử dụng các phế liệu, phế thải thay thế xi măng và cốt liệu trong sản xuất bê tông. Các nghiên cứu về cường độ chịu nén cũng như các yếu tố ảnh hưởng của vữa, bê tông chế tạo từ phế liệu, phế thải công nghiệp làm việc ở nhiệt độ cao được đề cập nhiều từ đầu thế kỷ 20. Tác giả S.Ayudin và B.Baradan [2] cho rằng vữa

sử dụng cốt liệu xi bọ và xi măng PC với 60 % tro bay không tổn thất cường độ nén ở 900 °C. Tác giả F.Koksal và các cộng sự [3] đã chế tạo vữa sử dụng cốt liệu vermiculite và xi măng PC, silica fume, mẫu có cường độ nén 2,9 ÷ 8,5 MPa ở 900 °C, còn lại 31,1 ÷ 58,2 % so với giá trị cường độ ở nhiệt độ thường và kết luận rằng vữa sử dụng vermiculite là vật liệu chịu nhiệt tốt. Theo I.Neitinger [4], khi sử dụng cốt liệu ngói vỡ chế tạo bê tông, cường độ uốn và nén của bê tông ở 400 °C thậm chí cao hơn khi sử dụng các cốt liệu như xi luyện kim, dolomite, đá diaba, cát (đạt gần 80 % so với cường độ ở nhiệt độ thường); ở 1000 °C cường độ uốn còn khoảng 10 % và cường độ nén còn khoảng 30 % so với cường độ ở nhiệt độ thường. Tác giả X. Yigang và các cộng sự [5] nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia tro bay, tỷ lệ nước/chất kết dính và điều kiện dưỡng hộ đến các tính chất của bê tông ở nhiệt độ cao. Kết quả cho thấy, mẫu bê tông sử dụng tro bay có chất lượng tốt hơn mẫu bê tông sử dụng xi măng PC ở nhiệt độ 650 °C. Tác giả H.Tanyildizi, A.Coskun [6] công bố mẫu bê tông sử dụng cốt liệu xỉ núi lửa chứa 30 % tro bay có cường độ chịu nén ở 800 °C còn lại 42,15 % so với ở nhiệt độ thường.

Khả năng chịu nhiệt của bê tông rất phức tạp vì bê tông không

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

Nhận ngày 31/12/2022, sửa xong ngày 15/02/2023, chấp nhận đăng 31/03/2023

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2023.477>

chỉ là vật liệu composite với các thành phần chịu nhiệt khác nhau mà còn phụ thuộc và các yếu tố liên quan đến phương pháp thí nghiệm. Cường độ bê tông làm việc ở nhiệt độ cao phụ thuộc vào các yếu tố liên quan thành phần vật liệu như tỷ lệ nước/xi măng, tỷ lệ nước/chất kết dính, lượng xi măng, các loại phụ gia khoáng, vùng liên kết giữa cốt liệu và đá xi măng, các loại cốt liệu và kích thước; và một số yếu tố liên quan đến điều kiện thí nghiệm như điều kiện đúc mẫu, tốc độ gia nhiệt, cách làm nguội mẫu, điều kiện gia tải và chế độ ẩm,... [1], [5], [7].

Bài báo giới thiệu sự ảnh hưởng của thành phần vật liệu và điều kiện thí nghiệm (phương pháp làm nguội mẫu) đến tính chất của bê tông theo nhiệt độ. Bê tông được chế tạo từ cốt liệu tro xỉ nhiệt điện, chất kết dính từ xi măng pooc lăng và phụ gia khoáng hỗn hợp tro bay, silica fume. Mối quan hệ giữa thành phần vật liệu và cường độ chịu nén của bê tông ở 800 °C được xây dựng bởi phương pháp quy hoạch bậc

hai tâm xoay. Kết quả nghiên cứu có thể bổ sung dữ liệu về loại bê tông sử dụng phế thải công nghiệp và hướng tới nghiên cứu rộng rãi trong lĩnh vực vật liệu chịu nhiệt ở Việt Nam.

## 2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Vật liệu

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này gồm xi măng PC40 Sông Gianh (PC), tro bay (FA) và tro xỉ (TX) của nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân, Silica fume (SF) dưới dạng bột (kết nén) được cung cấp bởi hãng Sika. Thành phần hoá và tính chất của các vật liệu được giới thiệu trong Bảng 1 và Bảng 2. Tính chất cơ lý của các vật liệu được xác định theo các TCVN 6016:2011, TCVN10302:2014, TCVN8827:2011, TCVN 6017:2015, TCVN 4030:2003 và TVCN 7572:2006.

**Bảng 1.** Thành phần hóa của các vật liệu.

Vật liệu	Hàm lượng các loại ôxit, %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MKN
PC	21,09	6,53	3,43	64,21	0,85	0,15	2,91	-	0,83
FA	55,20	20,97	6,27	0,95	1,54	0,13	3,39	0,54	11,0
SF	90,26	1,05	1,03	1,23	1,41	0,02	2,03	0,91	2,03
TX	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 cơ lý của xi măng, FA, SF và tro xỉ nhiệt điện.

Tính chất	PC	FA	SF	TX
Cường độ nén (28 ngày) , MPa	46,9	-	-	-
Chỉ số hoạt tính cường độ (28 ngày), %	-	89,8	109,2	-
Lượng nước tiêu chuẩn, %	32	-	-	-
Thời gian bắt đầu đông kết, phút	110	-	-	-
Thời gian kết thúc đông kết, phút	150	-	-	-
Độ mịn – Sốt sàng 0,09 mm, %	1	0	-	-
Bề mặt riêng, m <sup>2</sup> /g	-	-	17,7	-
Khối lượng riêng, g/cm <sup>3</sup>	3,11	2,29	2,22	2,07
Khối lượng thể tích xốp, kg/m <sup>3</sup>	970	980	700	790

trong đó, “-” là không xác định

Xi măng có các tính chất cơ lý thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682:2009. FA thuộc loại F theo TCVN 10302:2014. SF có chỉ số độ hoạt tính và bề mặt riêng thoả mãn yêu cầu theo TCVN 8827:2011.

Thành phần hạt của tro xỉ nhiệt điện xác định theo TCVN 7572:2006

được thể hiện trong Bảng 3.

Phụ gia siêu dẻo ADVA® CAST 5388V của hãng Grace gốc polymer có tỷ trọng 1,08 kg/l được sử dụng nhằm điều chỉnh tính công tác của hỗn hợp bê tông.

**Bảng 3.** Thành phần hạt cốt liệu tro xỉ nhiệt điện.

Thành phần hạt	Cỡ hạt, mm						
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Lượng sót riêng biệt, a <sub>i</sub> %	0	9,3	8,6	7,9	15,0	36,0	23,1
Lượng sót tích lũy, A <sub>i</sub> %	0	9,3	18,0	25,9	40,9	76,9	100

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Thành phần hạt là yếu tố quan trọng, ảnh hưởng đến tính công tác của hỗn hợp bê tông cũng như các tính chất của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao như cường độ, độ bền nhiệt, nhiệt độ biến dạng dưới tải trọng, độ bền xi, độ co ngót, .... [8-11]. Thành phần hạt cốt liệu tro xỉ nhiệt điện trong nghiên cứu này được tính toán bởi công thức Andersen. 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  $d_i$  cho trước (%).

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

Chất kết dính sử dụng cho bê tông gồm xi măng PC cùng các phụ gia khoáng FA và SF. Trong nghiên cứu này, các phụ gia khoáng với hàm lượng thay thế xi măng PC là 15 % FA và 5 % SF được áp dụng [12], [13].

Thành phần cấp phối 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 [11] và hiệu chỉnh khi sử dụng phụ gia siêu dẻo để hỗn hợp bê tông có độ cứng 25 s và cường độ chịu nén ở tuổi 7 ngày sau sấy 100 °C tối thiểu 20 MPa. Các thí nghiệm được thực hiện với các tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) là 0,55 ÷ 0,65, thành phần hạt (thông qua giá trị tính toán  $n$  của công thức Andersen) với  $n$  là 0,33 ÷ 0,40.

Thực nghiệm tiến hành trên cơ sở xác định các tính chất của hỗn hợp bê tông và mẫu bê tông kích thước 70,7×70,7×70,7 mm. Tính công tác và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông được xác định theo TCVN 3107:1993 và TCVN 3108:1993. Mẫu bê tông sau khi chế tạo và dưỡng hộ 24h trong khuôn với độ ẩm  $\geq 95 \%$ , nhiệt độ  $27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , được ngâm trong nước 6 ngày với nhiệt độ  $27 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sau đó, mẫu được đưa đi sấy ở 100 °C trong 48h 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. Mẫu được làm nguội đến nhiệt độ phòng và xác định cường độ chịu nén. Để đánh giá trạng thái làm việc của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao, người ta không chỉ xác định bằng trị số cơ học là cường độ chịu nén của mẫu ở nhiệt độ làm việc mà còn đánh giá qua giá trị % cường độ nén còn lại của nó so với giá trị cường độ ở 100 °C [10], [11].

Mối quan hệ giữa thành phần vật liệu và tính chất của bê tông được xây dựng bởi phương pháp quy hoạch bậc hai tâm xoay của Box và Hunter [14]. Hàm mục tiêu nghiên cứu là cường độ chịu nén của bê tông ở 800 °C và các yếu tố ảnh hưởng là tỷ lệ N/CKD được mã hoá là  $x_1$ , chỉ số mức  $n$  được mã hoá là  $x_2$ . Với 2 nhân tố ảnh hưởng nên  $k = 2$ , cánh tay đòn  $\alpha = 2^{\frac{1}{2}} = 1,414$ . Số thí nghiệm lập tại tâm  $n_0 = 5$ . Sử dụng công cụ Maple 17.0 (mã nguồn mở) tìm được phương trình hồi quy. Kiểm tra sự

phù hợp của các hệ số của phương trình bằng chuẩn Student và sự tương hợp của phương trình qua chuẩn Fisher.

Từ cấp phối tối ưu, nhóm tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của điều kiện thí nghiệm (cách làm nguội mẫu) đến cường độ chịu nén của bê tông theo nhiệt độ. Mẫu sau khi sấy 100 °C sẽ được nung ở các cấp nhiệt độ 200, 400, 600 và 800 °C với tốc độ nâng nhiệt không quá 5 °C/ph và thời gian hằng nhiệt là 2h. Sau khi nung, nhóm mẫu thứ nhất sẽ được làm nguội chậm trong không khí đến nhiệt độ phòng, nhóm mẫu thứ hai sẽ được làm nguội nhanh trong nước và ngâm trong 7 ngày [2], [15]. Sau khi làm nguội, mẫu được xác định cường độ chịu nén.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Thành phần bê tông

Các kết quả nghiên cứu khảo sát cho thấy N/CKD từ 0,55 ÷ 0,65 và  $n$  từ 0,33 ÷ 0,4 thì hỗn hợp bê tông có độ cứng khoảng 25 ÷ 37s. Chọn tỷ lệ N/CKD = 0,61 và  $n = 0,352$  là tâm quy hoạch, độ biến thiên là 0,02. Lượng dùng phụ gia siêu dẻo (SD) được tính theo lượng dùng chất kết dính. Mã hoá các biến cùng các mức quy hoạch thực nghiệm, tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông thể hiện ở Bảng 4 và Bảng 5.

Lựa chọn mô hình hồi quy có dạng:  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_1x_1^2 + b_2x_2^2$ . Sử dụng công cụ Maple 17.0 thiết lập được phương trình hồi quy cường độ chịu nén bê tông ở 800°C. Kiểm tra ý nghĩa của các hệ số theo chuẩn Student, phương trình hồi quy (2) được xác định.

$$y_{R_n} = 13,8579 + 0,6761x_2 - 0,4250x_1x_2 - 0,7640x_1^2 - 1,0291x_2^2 \quad (2)$$

Kiểm tra sự tương hợp của phương trình (2) theo chuẩn  $F$  (Fisher) [14]. Giá trị  $F$  được tính là 3,6 nhỏ hơn giá trị  $F$  tra bảng nên phương trình tương hợp với bức tranh thực nghiệm. Đồ thị biểu diễn phương trình (2) thể hiện ở Hình 1.

Kết quả thực nghiệm cho thấy, khi tỷ lệ N/CKD giảm thì hỗn hợp bê tông có độ cứng tăng, mẫu được lèn chặt và cường độ chịu nén tăng. Điều này đúng với quy luật của bê tông làm việc ở nhiệt độ thường. Thành phần hạt ảnh hưởng phức tạp hơn đến tính chất của hỗn hợp bê tông. Khi chỉ số  $n$  tăng (mức quy hoạch  $x_2 = 0$  và 1,414), hàm lượng cốt liệu giảm, lớp hồ chất kết dính bao bọc hạt cốt liệu dày hơn nên nội ma sát trong hệ giảm dẫn đến độ cứng và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông giảm. Tại mức quy hoạch  $x_2 = \pm 1$ , khi  $n$  tăng thì lượng dùng cốt liệu tăng, lớp hồ chất kết dính bao bọc hạt cốt liệu mỏng hơn nên nội ma sát trong hệ tăng dẫn đến độ cứng và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông tăng. Ngoài ra, khi  $n$  tăng thì cỡ hạt lớn sẽ tăng và cỡ hạt nhỏ giảm, hỗn hợp hạt lúc này sẽ bao gồm phần lớn các hạt bề mặt hạt nhám ráp, độ rỗng xốp cao nên hỗn hợp bê tông sẽ kém lưu động nếu giữ nguyên lượng nước [8], [9].

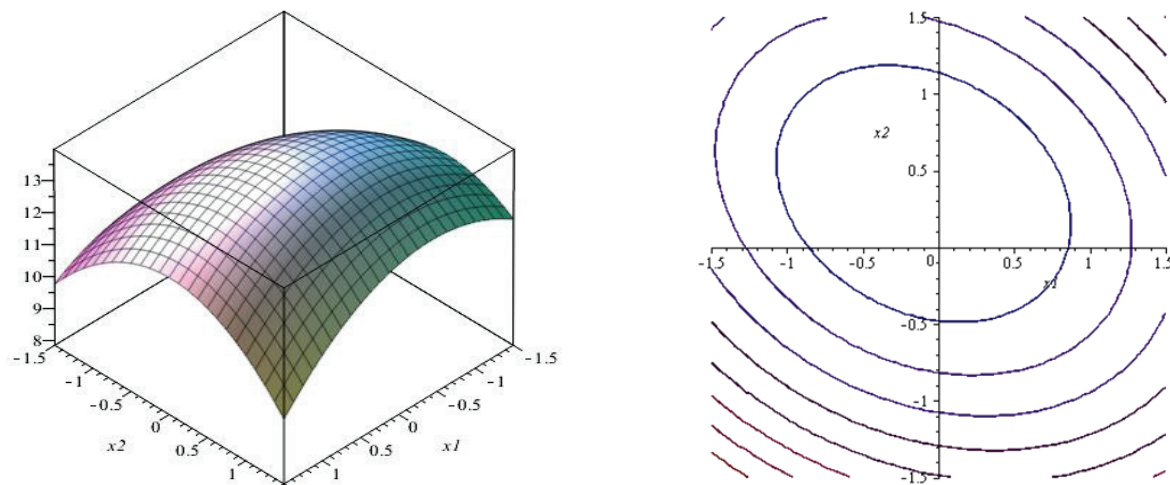
Bảng 4. Kế hoạch thí nghiệm.

Nhân tố	Biến mã hóa	Các mức quy hoạch					Độ biến thiên
		$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$	
N/CKD	$x_1$	0,58	0,59	0,61	0,63	0,64	0,02
Chỉ số $n$	$x_2$	0,324	0,332	0,352	0,372	0,380	0,02

**Bảng 5.** Tính chất hỗn hợp bê tông và bê tông theo kế hoạch thực nghiệm.

Mẫu	Biến mã		Biến thực		Tính chất hỗn hợp bê tông		Cường độ chịu nén, $R_n$ (MPa)	
	$x_1$	$x_2$	N/CKD	n	ĐC, s	$\gamma_o$ , kg/m <sup>3</sup>	Ở 100°C	Ở 800°C
T1	1	1	0,63	0,372	27	1791,7	22,0	12,8
T2	1	-1	0,63	0,332	26	1777,3	21,1	11,9
T3	-1	1	0,59	0,372	29	1800,1	24,3	14,1
T4	-1	-1	0,59	0,332	28	1799,2	21,1	11,6
T5	1,414	0	0,64	0,352	22	1778,2	22,1	12,1
T6	-1,414	0	0,58	0,352	36	1816,2	20,3	11,5
T7	0	1,414	0,61	0,380	27	1798,4	21,6	12,0
T8	0	-1,414	0,61	0,324	27	1789,3	19,1	10,6
T9	0	0	0,61	0,352	28	1797,4	23,9	13,9
T10	0	0	0,61	0,352	26	1787,6	23,9	13,8
T11	0	0	0,61	0,352	25	1767,4	23,0	13,1
T12	0	0	0,61	0,352	26	1778,3	23,8	14,2
T13	0	0	0,61	0,352	27	1779,2	24,1	14,2

trong đó, ĐC là độ cứng của hỗn hợp bê tông (s);  $R_n$  là cường độ chịu nén (MPa);  $\gamma_o$  là khối lượng thể tích (kg/m<sup>3</sup>).



**Hình 1.** Bề mặt biểu diễn mối quan hệ giữa cường độ chịu nén của bê tông ở 800 °C và các biến số.

Các hệ số của phương trình hồi quy cũng cho thấy chỉ số n ảnh hưởng nhiều hơn đến tính chất của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao so với tỷ lệ N/CKD. Thành phần hạt tối ưu không phải giá trị lựa chọn ở tâm quy hoạch. Chỉ số n tăng dẫn đến hàm lượng hạt kích thước lớn tăng nên độ rỗng của hỗn hợp cốt liệu tăng lên do cốt liệu cỡ 0,63 ÷ 2,5 mm trong nghiên cứu có độ rỗng xấp xỉ cao. Tuy nhiên, bê tông lúc này lại có giá trị cường độ chịu nén cao. Có thể do sự sắp xếp các hạt cốt liệu cũng như tại vị trí tiếp xúc giữa đá xi măng và cốt liệu xuất hiện các kẽ nứt tế vi, chúng làm tăng biên độ dao động của các hạt khi đốt nóng và làm nguội sản phẩm dẫn đến độ bền nhiệt của bê tông tăng và cường độ chịu nén tăng. Các quá trình biến đổi hoá lý xảy ra giữa các khoáng trong đá xi măng với phụ gia khoáng cũng như cũng như vi cốt liệu trong bê tông khi đốt nóng có thể tạo ra những khoáng mới nâng cao độ bền cho bê tông.

Tỷ lệ vật liệu thành phần bê tông được tìm là N/CKD = 0,61 và n = 0,357 dựa vào phương trình (2), SD = 1,53 % (khối lượng, so với chất kết dính). Kết quả thực nghiệm cường độ chịu nén của bê tông ở 800°C không sai khác nhiều so với kết quả tính toán lý thuyết. Thành phần cấp phối tối ưu cho bê tông sử dụng tro xỉ nhiệt điện và SF được xác định là: TX 1053,2 (kg); PC 406,0 (kg); FA 76,1 (kg); SF 25,4 (kg); N 309,6 (lít) và SD 7,8 (lít). Thành phần hạt tối ưu của cốt liệu thể hiện trong Bảng 6. So với GOST 20910:2019 [16], cốt liệu trong nghiên cứu có cỡ hạt từ 0,315 ÷ 5 mm đạt yêu cầu về thành phần hạt cho bê tông chịu nhiệt, cỡ hạt 0,14 ÷ 0,315 mm có hàm lượng thấp hơn và cỡ hạt mịn < 0,14 mm nhiều hơn. Thành phần hạt của các loại tro xỉ nhà máy nhiệt điện Cẩm Phả, Duyên Hải cũng tương tự khi tính toán với n = 0,43 và 0,387 [8], [9].

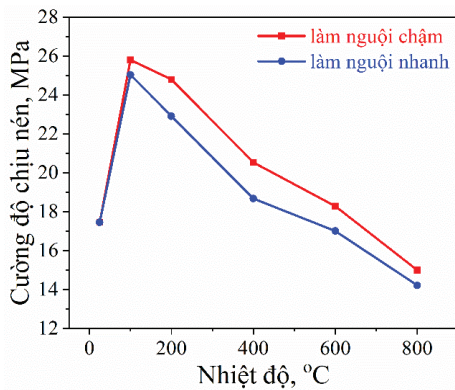


**Bảng 6.** Thành phần hạt cốt liệu tối ưu cho bê tông làm việc ở nhiệt độ cao.

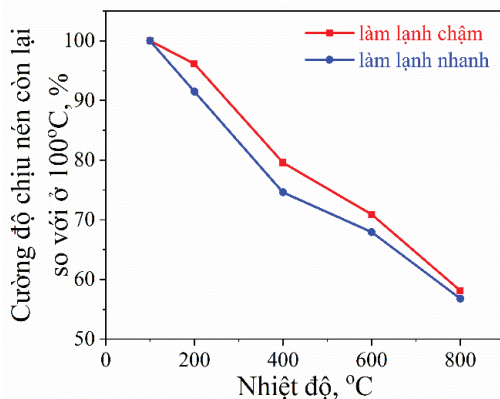
Thành phần hạt	Cỡ hạt, mm						
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Lượng sót riêng biệt, $a_i$ %	0	21,9	17,1	13,2	10,5	9,4	27,9
Lượng sót tích lũy, $A_i$ %	0	21,9	39,0	52,3	62,7	72,1	100

**3.2. Cường độ chịu nén của bê tông ở các cấp nhiệt độ**

Ảnh hưởng của nhiệt độ trong khoảng 25 ÷ 800 °C đến giá trị cường độ chịu nén của bê tông khi làm nguội nhanh và làm nguội chậm được thể hiện trong Hình 2 và Hình 3.



**Hình 2.** Cường độ chịu nén của bê tông ở các cấp nhiệt độ.



**Hình 3.** Cường độ chịu nén của bê tông ở các cấp nhiệt độ so với ở 100 °C.

Cường độ chịu nén của mẫu tăng lên ở khoảng 100 °C và có xu hướng giảm khi nhiệt độ lớn hơn 200 °C và giảm mạnh hơn ở khoảng nhiệt độ lớn hơn 400 °C (Hình 2). Sự giảm cường độ xảy ra do sự mất nước của các gel C-S-H, phân hủy thành phần  $Ca(OH)_2$ ,  $CaCO_3$ , ... dẫn đến thay đổi hình thái học của bê tông và hình thành các vết nứt tế vi. Sự phân hủy  $Ca(OH)_2$  không phải là yếu tố quyết định làm giảm cường độ bê tông làm việc ở nhiệt độ cao nhưng nó là nguyên nhân dẫn đến sự phá hủy cấu trúc bê tông do sự nở thể tích khi CaO tự do thủy hoá lần hai khi làm nguội. Sử dụng FA và SF làm phụ gia khoáng trong bê tông có thể giảm ảnh hưởng của  $Ca(OH)_2$ . Phản ứng giữa  $Ca(OH)_2$  và  $SiO_2$  có trong phụ gia khoáng sẽ giảm hàm lượng  $Ca(OH)_2$ . Ở 100 °C,

cường độ chịu nén của mẫu bê tông là 25,0 ÷ 25,8 MPa tăng khoảng 1,5 lần so với cường độ chịu nén ở nhiệt độ ở 25 °C. Bản chất của hiện tượng này do lượng ẩm thoát ra từ cốt liệu, chúng thúc đẩy quá trình thủy hóa tiếp tục của xi măng, dẫn đến làm tăng cường độ bê tông nhưng lại không làm tăng độ co ngót [1]. Đến 200 °C, cường độ các mẫu có xu hướng giảm nhẹ, còn lại 91,5-96,1 % so với ở 100 °C (Hình 3). Sự bay hơi nước trong giai đoạn này thúc đẩy quá trình “tự chưng hấp” trong đá chất kết dính làm sự suy giảm cường độ của bê tông thấp. Cường độ chịu nén các mẫu giảm mạnh khi nung đến 600°C, còn lại khoảng 67,9-70,9 % so với ở 100 °C, có thể liên quan đến sự phân ly của  $Ca(OH)_2$  tạo ra CaO [12], [17]. Ngoài ra, liên kết giữa cốt liệu và đá xi măng giảm bởi sự mất nước của đá xi măng gây co ngót trong khi cốt liệu dãn nở ở khoảng nhiệt độ này. Khi tăng nhiệt độ đến 800 °C, các mẫu có cường độ chịu nén 14,2 ÷ 15,0 MPa, còn lại 56,8 ÷ 58,1 % so với cường độ chịu nén ở 100 °C. Trong khi đó, bê tông thường làm việc ở khoảng nhiệt độ này thì giá trị cường độ chịu nén chỉ còn lại khoảng 10 ÷ 20 % là công bố của các tác giả U. Schneider, J. Xiao [1], [18]. Các thành phần  $SiO_2$  và  $Al_2O_3$  hoạt tính có trong FA và SF sẽ tương tác với  $Ca(OH)_2$  trong đá xi măng, bổ sung các khoáng C-S-H và C-A-S-H, đặc biệt ở khoảng nhiệt độ 200 ÷ 400 °C [6], [11-13]. Khi đốt nóng đến 800 °C, sự xuất hiện các khoáng mới như CS,  $C_2AS$  trong bê tông có khả năng lên chặt cấu trúc và bền nhiệt có thể là nguyên nhân làm sự suy giảm cường độ ở nhiệt độ cao giảm. Ngoài ra, sự lựa chọn vật liệu nghiên cứu, thiết kế thành phần hợp lý cũng đã cải thiện được cường độ chịu nén của bê tông ở nhiệt độ cao.

Phương pháp làm nguội mẫu sau khi nung là một trong những yếu tố ảnh hưởng đến sự chịu nhiệt của vật liệu. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi làm nguội nhanh mẫu trong nước thì sự tổn thất cường độ là cao hơn so với làm nguội chậm trong không khí ở các cấp nhiệt độ (Hình 3). Nguyên nhân là do sự chuyển đổi của  $Ca(OH)_2$  thành CaO ở khoảng 400 ÷ 500 °C. Tiếp theo, khi mẫu ngâm trong nước, CaO sẽ tiếp xúc với nước để tạo thành  $Ca(OH)_2$  kèm theo sự giãn nở về thể tích mẫu kèm vết nứt. Mặt khác, hàm lượng nước bão hòa trong mẫu cũng tăng lên cũng có thể là nguyên nhân làm giảm cường độ chịu nén [16], [19].

Tuy nhiên sự chênh lệch về giá trị cường độ chịu nén ở các cấp nhiệt độ của mẫu bê tông với hai phương pháp làm nguội là không nhiều, đặc biệt là sự chênh lệch đã giảm đi khi nhiệt độ tăng đến 800 °C. Điều này là do hầu hết các vết nứt nhỏ đã xuất hiện ở khoảng nhiệt độ 400 ÷ 600 °C. Khi làm nguội chậm, tốc độ giảm cường độ chịu nén của mẫu ở khoảng 200 ÷ 800 °C là cao hơn khi làm nguội nhanh. Mẫu trở nên giòn hơn. Đôi khi  $Ca(OH)_2$  hình thành có thể có lợi do tác dụng lấp đầy vết nứt và khoảng trống trong trường hợp làm nguội mẫu trong nước [15]. Những nghiên cứu về các điều kiện thí nghiệm như chế độ gia công nhiệt, tải trọng tác dụng, hình dáng – kích thước mẫu,... ảnh hưởng đến

tính chất của bê tông cũng cần được quan tâm và nghiên cứu để hoàn thiện dữ liệu về loại bê tông đặc biệt này.

#### 4. Kết luận

Từ các kết quả đã trình bày, một số kết luận như sau được rút ra như sau:

- Có thể sử dụng tro xỉ nhiệt điện chế tạo bê tông làm việc đến 800 °C. Cường độ chịu nén của bê tông ở 800 °C còn lại trên 56 % so với giá trị cường độ chịu nén ở 100°C, đảm bảo khả năng chịu lực.

- Phương trình hồi quy thể hiện mối quan hệ giữa cường độ chịu nén bê tông ở 800°C và tỷ lệ N/CKD, thành phần hạt được thiết lập. Qua đó tìm được thành phần cấp phối tối ưu của bê tông với tỷ lệ N/CKD là 0,61 và n là 0,357.

- Mức độ ảnh hưởng của thành phần hạt cốt liệu từ tro xỉ nhiệt điện đến cường độ chịu nén của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao lớn hơn so với yếu tố N/CKD.

- Cường độ chịu nén của bê tông biến đổi theo nhiệt độ. Tốc độ suy giảm cường độ thấp ở khoảng 100 ÷ 200 °C (còn lại khoảng 91,5 ÷ 96,1 % so với ở 100 °C) và tăng lên ở khoảng 200 ÷ 600 °C (còn lại khoảng 69,9 ÷ 70,9 %) và suy giảm mạnh ở 600 ÷ 800 °C (còn lại khoảng 56,8 ÷ 58,1 %).

- Phương pháp làm nguội ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của bê tông theo nhiệt độ. Làm nguội bằng nước tổn thất cường độ chịu nén cao hơn khi làm nguội trong không khí. Mức độ chênh lệch về giá trị cường độ chịu nén giữa hai phương pháp làm nguội khoảng 3 ÷ 9 % và giảm dần khi nhiệt độ tăng đến 800 °C.

#### Tài liệu tham khảo

[1]. Schneider, U., "Concrete at high temperatures—A general review," *Fire Saf. J.*, vol. 13(1), pp. 55–68, 1988, doi: 10.1016/0379-7112(88)90033-1.

[2]. Aydın, S., & Baradan, B., "Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37(6), pp. 988–995, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.005.

[3]. Koksall, F., Gencel, O., Brostow, W., Lobland, H.E., "Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite," *Mater. Res. Innov.*, vol. 16 (1).

[4]. Netinger, I., Kesegic, I., Guljas, I., "The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates," vol. 46(7), pp. 425–430, 2011, doi: 10.1016/j.firesaf.2011.07.002.

[5]. Yigang, X., Wong, Y.L., Poon, C.S., "Damage to PFA concrete subject to high

temperatures," in *Proceedings of International Symposium on High Performance Concrete-Workability, Strength and Durability*, 2000, pp. 1093–1100.

[6]. Tanyildizi, H., Coskun, A., "The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22(11), pp. 2269–2275, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.033.

[7]. Koksall, F., Gencel, O., Kaya, M., "Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, pp. 175–187, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021.

[8]. Đỗ Thị Phương, Lê Văn Trí, Vũ Minh Đức, "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 - ĐHXD*, vol. 13 (5V), pp. 124–132, 2019, doi: 10.31814/stce.nuce2019-13(5V)-14.

[9]. Thi Phuong Do, Nguyen Lam, Minh Duc Vu, "Study on particle size distribution of aggregate from coal ash for heat-resistant concrete," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/869/3/032044.

[10]. Đỗ Thị Phương, Vũ Minh Đức, "Ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến tính chất của bê tông chế tạo từ tro bay và silica fume," *Tạp Chí Vật Liệu Và Xây Dựng*, vol. 11(5), pp. 1–5, 2021.

[11]. Nekrasov, K.D., Tarasova, A.P., *Heat-resistant concrete using Portland cement*. Structural Literature Publisher. Moscow. [in Russian], 1969.

[12]. Thi Phuong Do, Van Quang Nguyen, Minh Duc Vu, "A Study on Property Improvement of Cement Pastes Containing Fly Ash and Silica Fume After Treated at High Temperature," in *Proceedings of the International Conference GTSD 2020, Computational Intelligence methods for Green technology and Sustainable Development*, Springer, 2021, pp. 532–542. doi: 10.1007/978-3-030-62324-1\_45.

[13]. Heikal, M., El-Diadamony, H., Sokkary, T.M., Ahmed, I.A., "Behavior of composite cement pastes containing microsilica and fly ash at elevated temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 1180–1190., 2013.

[14]. Nguyễn Minh Tuyền, *Quy hoạch thực nghiệm*. NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2005.

[15]. K.D. Hertz, "Concrete strength for fire safety design," *Mag Concr. Res.*, vol. 56(8), pp. 445–453, 2005.

[16]. GOST 20910-2019, "Heat-resistant concrete," Technical requirements Moscow. [in Russian], 2019.

[17]. Remnev, V.V., "Heat-resistant properties of cement stone with finely milled refractory additives," *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 37(5), pp. 151–152, 1996.

[18]. Xiao, J., & König, G., "Study on concrete at high temperature in China—An overview," *Fire Saf. J.*, vol. 39(1), pp. 89–103, 2004, doi: 10.1016/S0379-7112(03)00093-6.

[19]. Sarshar, R., Khoury, G.A., "Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures," *Mag Concr. Res.*, vol. 45(162), pp. 51–61, 1993.